

BeFo



Lagring och transport av vattenburen värme i berg

Fältförsök

S Bjurström, H Cederberg, A Göransson
T Hanson, R Lindskog, J Martna

Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo och
Statens Råd för Byggnadsforskning – BFR

Lagring och transport av vattenburen värme i berg

Fältförsök

Storage and distribution of hot water in unlined rock caverns and tunnels.

Fieldtests

Rapport avseende BeFo:s fältförsök i Marviken samt mätningar vid Uggleviksvägen
i samarbete med Stockholms Energiverk, Storstockholms Energi AB (STOSEB) och
Vattenfall

sammanställd av

Sten Bjurström

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
Förord	4
Sammanfattning	6
1 Inledning	8
2 Tekniska förutsättningar för lagring och transport av varmt vatten i berg	9
3 Bergtekniska problem vid lagring och transport av varm- och hetvatten i berg	12
4 Beskrivning av forskningsprojektet	12
5 Väsentliga resultat i tidigare arbetena (Ettapp I)	13
6 Utförda utredningar i ettapp II	16
7 Mätningar i oljelager vid Marvikens kraftstation	18
7.1 Orientering	18
7.2 Geologi. Kartering av bergtekniska förhållanden	19
7.3 Mätinstallationer och genomförande	21
7.4 Uppvärmning av oljelagret och berget	24
7.5 Mätresultat	24
7.6 Diskussion av Marvikenförsöken	30
8 Försök med cirkulerande uppvärmt vatten i ett grovt bergborrhål	36
8.1 Bakgrund	36
8.2 Försöksplats	37
8.3 Försöksanordning	39
8.4 Mätutrustning och mätprogram	40
8.5 Försökens genomförande	42
8.6 Utvärdering av erhållna resultat	43
8.7 Diskussion	49
8.8 Vattenundersökningar	52
8.9 Diskussion av vattenundersökningarna	53
9 Slutsatser, fortsatt FoU-arbete	56
10 Utförda utredningar, arbetsrapporter och referenser	60
Bilagor	

F Ö R O R D

Forskningsuppgiften "Lagring och transport av vattenburen värme i berg" ingår som projekt i Stiftelsen bergteknisk Forskning - BeFo:s ramprogram. Projektet, som är indelat i fyra etapper är planerat att genomföras 1972 - 1978.

Föreliggande rapport redovisar resultat av etapp II.

Projektets syfte är att ge underlag för utformning och konstruktion av anläggningar för lagring och transport av varm- och hetvatten i berg. Hittills genomförda utredningar har studerat olika grupper av problem, såväl teoretiskt som i laboratorie- och fältförsök.

En helhetsprövning av framkomna resultat och erfarenheter avses senare ske i verklighetstrogna stora fältförsök i vilka system för lagring respektive transport av varmt vatten i ett oinklätt bergutrymme studeras i full skala i demonstrationsanläggningar.

Projektet är ursprungligen baserat på ett forskningsförslag utarbetat inom Skånska Cementgjuteriet AB i samarbete med bl a Västerås Kraftvärmeverk AB. Under utredningstiden har målsättningen vidgats att även omfatta transport av varmt vatten i berg. Detta idéförslag, som utarbetats inom Stockholms Energiverk, har studerats i ett särskilt samarbetsprojekt med Energiverket, Storstockholms Energi AB och Vattenfall.

Med hänsyn till att projekten är komplicerade och berör många skilda teknikområden och intressegrupper har projekten följts av två referensgrupper.

I referensgruppen för "Lagring av värme i berg" (f d Hetvattenackumulering i berg) ingår överingenjör Sten Brännfors (ordf.), tekn Dr Sten G A Bergman, civilingenjör Tor Hansson, överingenjör Gösta Jansson, civilingenjör Lars Lundström, direktör Lars Netzler, överingenjör Bengt Oknemark, överingenjör Torild Persson, civilingenjör Sven G Rydman och överingenjör Karl Arthur Scherman. I gruppen har även ingått som sekreterare projektledaren tekn lic Sten Bjurström.

Under denna referensgrupp har en särskild arbetsgrupp svarat för arbetets genomförande. Gruppen har bestått av projektledaren tekn lic Sten Bjurström BeFo, civilingenjör Hans Cederberg och fil lic Juri Martna, Statens Vattenfallsverk och civilingenjör Rolf Lindskog Vattenbyggnadsbyrån AB.

I etapp II - fältförsök i Marviken - har T Hansson i huvudsak svarat för utfört arbete med stöd av S Bjurström och J Martna.

Referensgruppen för delprojektet "Transport av vattenburen värme i berg (f d kärnvärmedistribution)" har varit tekn dir Brismar (ordf.), tekn lic Sten Bjurström, direktör H Gedung, civilingenjör Rolf Lindskog, byggnadschef M Nilsson, överingenjör Bengt Oknemark samt överingenjör Karl Arthur Scherman.

Civilingenjörerna Arne Göransson och Rolf Lindskog Vattenbyggnadsbyrån AB har svarat för arbetet i nära samarbete med referensgruppen.

För "Marvikenförsöken" har Statens råd för Byggnadsforskning beviljat 88.000:- i ekonomiskt stöd, varvid förutsattes att BeFo:s industriintressenter m fl bidrager med minst samma belopp. Sådant särskilt industribidrag har också erhållits från VAST och Aroskraft AB.

Finansieringen av "värmedistributionsprojektet" har delats mellan Stockholms Energiverk, Vattenfall, Storstockholms Energi AB och BeFo.

Förutom insatser av arbetsgruppens medlemmar har anlitats "extern" expertis vid arbetets genomförande. Bl a har fil kand Tom Lundgren vid SGI svarat för geologisk kartering av Marviken och docent Ulf Lindblom för värdefull granskning av projektet i vissa delar. Arbetsrapporter och särskilda utredningar redovisas i avsnitt ll.

För stöd och uppmuntran i arbetet samt den hjälp som lämnats arbetsgruppen av referensgrupper, expertis, bidragsgivare m fl framföres ett varmt tack.

Föreliggande sammanfattande rapport har utarbetats av Sten Bjurström på material från övriga i projektet. För att denna skall kunna läsas fristående från tidigare arbeten i etapprapport I, har vissa av resultaten i denna kort sammanfattats även i denna rapport.

Stockholm sommaren 1977

Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo

Sten Bjurström

Sten Bjurström
Projektledare

SAMMANFATTNING

I en tidigare etapp har olika bergtekniska frågor i samband med lagring och transport av varm- och hetvatten i berg studerats, huvudsakligen utifrån litteraturuppgifter och teoretiska överväganden. I utförd undersökning har vissa specifika frågeställningar experimentellt studerats i två fältförsök. Främst gäller detta temperaturspridning och spänningsuppbyggnad i berget samt eventuella kemiska förändringar hos lagringsvattnet. Överensstämmelsen mellan teori och verklighet i dessa frågor diskuteras, liksom fördjupade fortsatta undersökningar i bl a fullskaleförsök och demonstrationsanläggningar.

För att bl a belysa stabilitetsfrågorna i stora uppvärmda berggrum har mätningar av temperatur och spänningar i ett geologiskt väldokumenterat bergparti kring ett oljelager med varm olja utförts.

Av allmänt förekommande byggnadsverk i berg är tjockoljelager de som mest liknar en hetvattenackumulator. Temperaturmätare och relativa bergspänningsmätare har placerats i isolerade hål, som borrats från markytan ned till bergpartiet ovanför rummets tak. Uppvärmningsskedet i berget har sedan följts under ca 3 års tid, då man förvarat ca 50° olja i rummet.

I ett andra fältförsök har man studerat förhållandena kring ett 30 cm grovt och 20 m djupt horisontellt borrhål beläget i en fjärrvärmetunnel. I detta har cirkulerats varmt vatten av varierande temperaturer. Avsikten med försöket har varit att belysa några av de bergförhållanden som kan bli aktuella vid transport av varmt vatten direkt i bergtunnlar. I mäthål längs med och kring försöksborrhålet har temperatur och spänningar registrerats vid vattentemperaturer mellan 30 - 110°C. Utlösta produkter i lagringsvattnet liksom samspelet med omgivande grundvatten har utvärderats på basis av kemiska vattenanalyser.

Mätresultaten har givit värdefullt underlag när det gäller att värdera värmeförluster, stabilitetsfrågor och problem med utlösta produkter i lagringsvattnet.

Resultaten av fältförsöken i etapp II kan sammanfattas i följande huvudpunkter:

1. Temperaturmätningarna i berget kring oljelagret respektive grovborrhålet har givit en god bild av värmespridningen och temperaturfördelningen kring ett uppvärmt hålrum i berg. Jämförelser mellan mätta och beräknade värden har visat att man har förhållandevis goda möjligheter att med enkla beräkningar förutsäga dessa förhållanden i bergssammanhang.

2. Mätningarna visar att det krävs ca 1,5 - 2 år att uppvärma omgivande berg och nå fortfarighet. Efter denna tidpunkt kan man förvänta sig måttliga värmeförluster.
3. En ökning av bergtemperaturen medför värmespänningar i bergmanteln, som för en 100°C uppvärmning kan bli ca 0,1 - 0,3 av bergartens enaxiella tryckhållfasthet. Detta tillskott torde ej - bortsett från lokala ytaavskalningar - ge men för totalstabiliteten i normalfallet.
4. Vattenanalyser på cirkulationsvattnet visar att små förändringar kan ske i lagringsvattnets sammansättning. Endast efter synnerligen noggranna laboratorieanalyser har denna ändring gått att hänföra till utlöst bergmaterial. Utbyte med omgivande grundvatten har medfört avsevärt större ändringar.

Projektet har givit mycket värdefull mäterfarenhet, som är nödvändig för att i fortsättningen på ett tillförlitligt sätt djupare och mera systematiskt studera vissa detaljfrågor och följa och övervaka verkliga anläggningar.

Självfallet måste erhållna resultat tas med en "nypa salt", då de strikt sett endast är representativa för den på försöksplatsen rådande geologiska situationen, en situation som man dock normalt alltid har att beakta vid bergmekaniska mätningar. Å andra sidan är fältprovplatserna belägna i "normal" granit-gnejsberggrund, och sålunda representativa för svenska förhållanden.

Vissa specifika teoretiska frågeställningar bör fördjupas, men i huvudsak torde stabilitets- och temperaturfrågorna endast realistiskt kunna prövas i väl instrumenterade demonstrationsanläggningar.

1 INLEDNING

En stor del av den svenska energikonsumtionen avser uppvärmning. I de större städerna uppvärms stora bostadsområden med hetvatten i fjärrvärmesystem. Hetvattnet produceras normalt i dag i värmeverk och i kraftvärmeverk och utgöres ofta av överskottsvärme i elproduktion. I framtiden, då det krävs att man bättre tillvaratager överskottsenergi i samhället och bättre totalutnyttjar produktionsresurserna, torde en utbyggnad av fjärrvärmesystem och lagringsanläggningar vara nödvändig.

En sådan utveckling kräver effektiva system för transport och lagring av energin, oberoende av om ev denna kommer från kraft- och värmeverk, industriella processer eller utgöres av alternativa energikällor som ex sol och vind. Vid de konventionella energislagen är det i regel fråga om korttidsackumulering medan det för ex storskalig tillämpning av solvärme blir fråga om ackumulering från sommar- till vinterhalvår.

Transport och lagring av varmt vatten direkt i bergtunnlar har i dessa sammanhang bedömts ekonomiskt mycket attraktivt. Eftersom man ej prövat sådana system tidigare kräver en satsning på denna teknik särskilt noggrann bergteknisk planering, i vilken ingår avsevärda forsknings- och utvecklingsinsatser.

Inom BeFo, som är ett bergtekniskt forskningsorgan med stöd av näringsliv och staten, har man sedan några år bedrivit en brett upplagd forskning rörande de bergtekniska konsekvenserna av "lagring och transport av varmt vatten i berg" i syfte att ta fram konstruktionsunderlag för en bergackumulator. Undersökningen har främst varit inriktad på mindre lagringsvolymer - 5.000 - 30.000 m³ - med 85 - 135°C lagringstemperatur samt bergtunnlar i vilka transporteras vatten av högst 100°C temperatur.

Energilagringsbehovet i kraftproduktion har hittills för svenskt vidkommande kunnat hållas lågt på grund av att en betydande del produceras som lätt reglerbar vattenkraft. Med introduktionen av allt fler kraftvärmeverk och kärnkraftverk, som av ekonomiska och driftstekniska skäl bör köras med samma effekt håller denna situation på att förändras. Byggnad av pumpkraftverk, luftmagasinkraftverk och varm- och hetvattenlager kan i framtiden ge möjlighet till bättre energihushållning i kraftproduktionen.

En övergång till miljövänligare uppvärmningssystem i våra tätorter genom utbyggnad av fjärrvärmesystem kräver effektiva och ekonomiskt gynnsamma former för lagring och distribution av värmen. I detta perspektiv torde för större bostadsområden centrala värmelager i berg vid producent och konsument samt bergtunnlar för värmetransporten vara ett konkurrenskraftigt alternativ.

2 TEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR LAGRING OCH TRANSPORT AV VARMT VATTEN I BERG

2.1 Bergrum för varm- och hetvattenlagring

Principerna för ett tänkt värmelager i berg (hetvattenackumulator) är redovisade i etapprapport I, Bjurström et al 1974 (9). Här återges därför endast i korthet några huvudpunkter.

Ett förslag till hetvattenackumulator i berg visas i fig 1. Vattnet i bergrummet är via värmeväxlare förbundet med produktions- respektive förbrukarledningen. Vid "urladdning" tas uppvärmt vatten från rummets övre del och avkyllt returvatten pumpas in vid botten. Uppvärmning av vattnet sker antingen via värmeväxling med produktionsledningen eller med hjälp av t ex elenergi och värmepatroner. Temperaturer mellan 85 och 125°C kan tänkas vid spillvärmeutnyttjande, medan temperatur upp till 140 å 160°C är troligast vid eluppvärmning av ackumulatorvattnet. För kortare tider (dagar) torde lagringsvolymen på 4 000 - 30 000 m³ bli aktuella. För t ex "säsongssackumulering" torde det dock bli aktuellt med volymen mellan 200 - 300 000 m³.

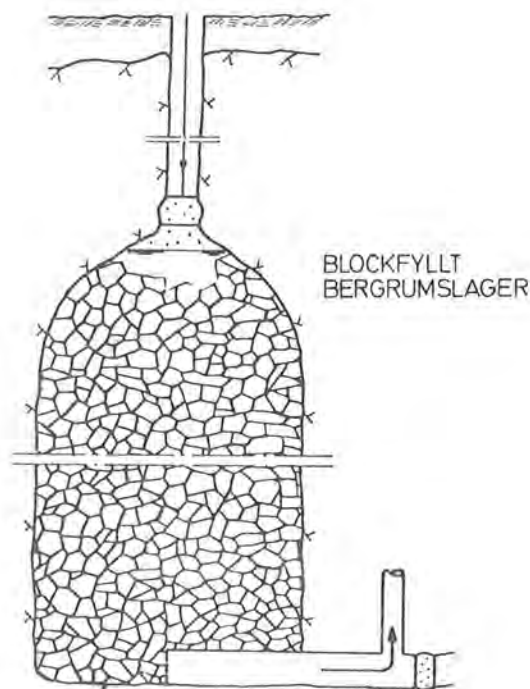
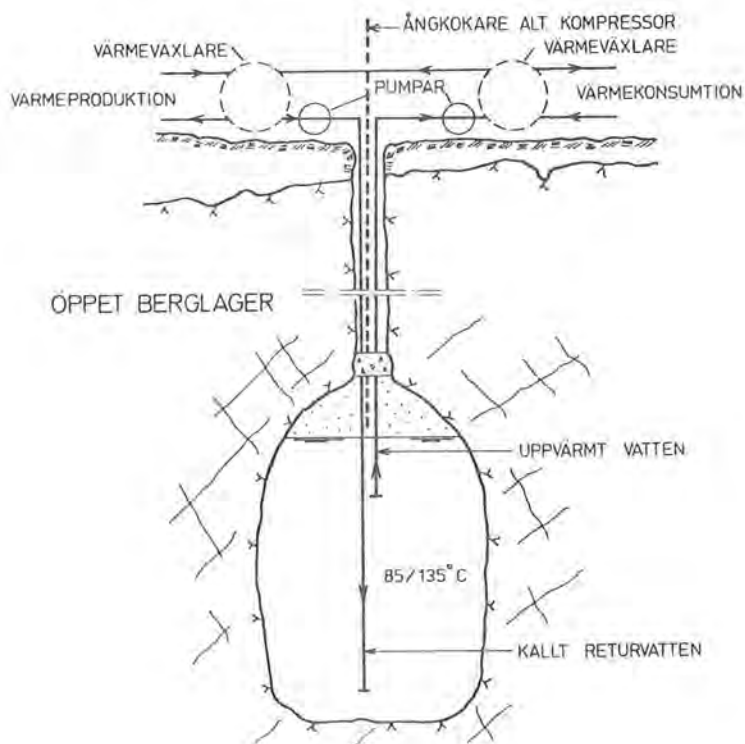


Fig 1 Princip för hetvattenackumulator i berg

2.2 Bergtunnlar för distribution av varmvatten

Stora mängder överskottsvärme kylv bort i kärnkraftverk. Genom att pumpa detta "kylvatten" till distributionspunkter i tätorter kan man ta tillvara överskottsenergien. Temperaturen hos det vatten som skall transporteras från kärnkraftverket bör för uppvärmningsändamål ha en temperatur av 100°C eller strax därunder.

Värmetransporten kan ske på två sätt, med enkel och dubbeltunnel.

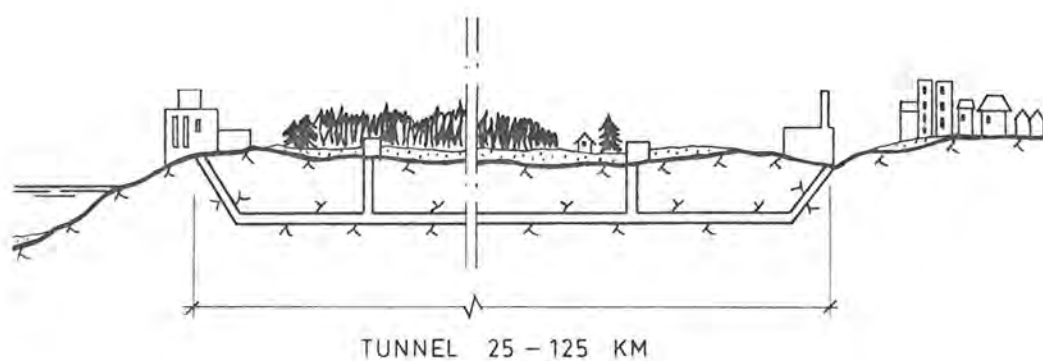
I det första fallet måste man ordna utsläpp av nyttjat varmvatten vid konsumtionsstället. Detta förutsätter en teknik med stora värmepumpar, då utgående vattentemperatur ej väsentligt bör överstiga vattentemperaturen vid utsläppsstället. I det senare fallet cirkuleras sötvatten i ett slutet tvärörssystem och värmen överföres via värmeväxlare.

Trots att entunnelsystemet erbjuder en rad fördelar, bl a avsevärt lägre anläggningskostnad, är det troligen dubbeltunnelsystemet att föredra, då det kräver mindre komplicerad teknik. I båda fallen utgör den mycket stora vattenvolymen i tunneln ett värmemagasin.

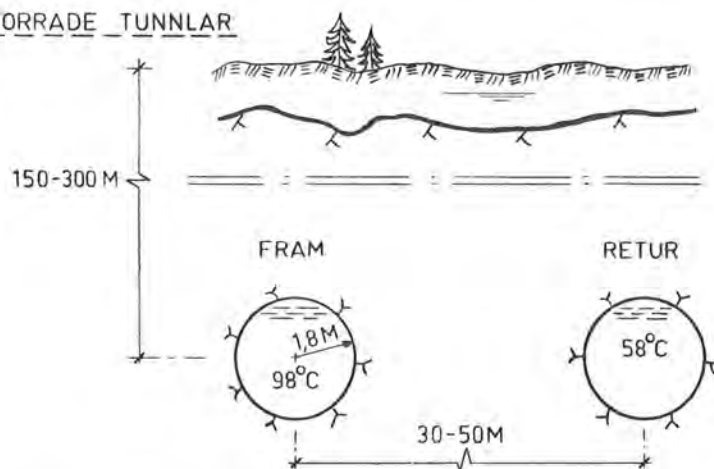
I båda fallen kan man tänka sig att leda vattnet i isolerade stålrör förlagda i en bergtunnel eller att låta vattnet strömma direkt i oinklädda bergtunnlar enligt fig 2.

Användes stålrör blir kostnaderna stora, men de tekniska problemen förhållandevis små, då denna teknik är väl känd. De relativt måttliga temperaturhöjningar som tunnelväggen utsätts för, torde ej ge några större bergmekaniska svårigheter.

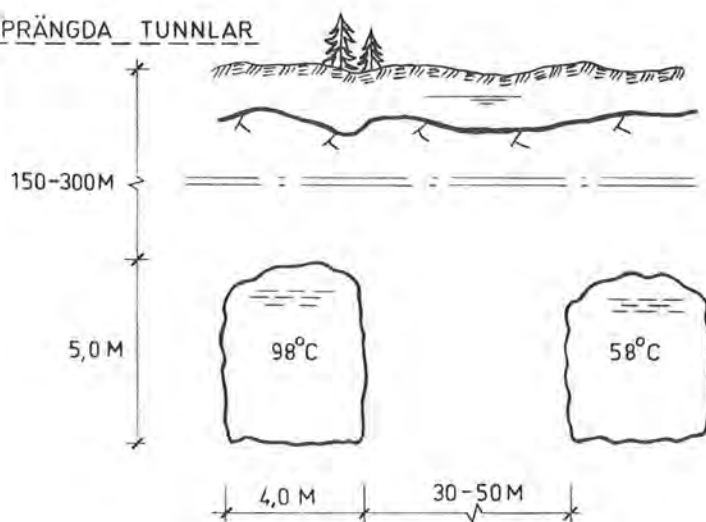
Alternativet med varmvatten direkt i tunneln är tekniskt mer komplicerat, men sannolikt ekonomiskt överlägset stålrörsalternativet. Överslagsberäkningar visar att värmeförlusten till berget blir till en början rätt stor, men efter något år torde värmeförlusterna vara helt acceptabla. Teoretiskt kan dessa kostnader hänföras till anläggningskostnaden.



BORRADE TUNNLAR



SPRÄNGDA TUNNLAR



Figur 2 Transporttunnel i berg för värmeöverföring från kärnkraftvärmeverk

3 BERGTEKNISKA PROBLEM VID LAGRING OCH TRANSPORT AV VARM- OCH HETVATTEN I BERG

Lagring och transport av uppvärmt vatten direkt i berget berör en rad mycket komplicerade och ofullständigt kända bergtekniska problemområden. Positiva erfarenheter från olje- och gaslagring i berg tyder på att många av dessa bergtekniska problem kan få en tillfredsställande lösning.

Då de tekniska konsekvenserna av lagring och transport av varm- och hetvatten direkt i berg ej tidigare systematiskt studerats, krävs omfattande forskning och utveckling innan man kan bygga t ex en hetvattenackumulator i berg. Tillämpliga litteraturuppgifter inom området är mycket sparsamt förekommande och teoretiska spekulationer bedöms ej kunna ge tillräckligt fast underlag för konstruktionsarbetet. Man är sålunda i stor utsträckning hänvisad till olika försök och mätningar i laboratorium och i fält.

I etapp I (Bjurström et al(9)) diskuteras olika problem vid värmelagringen i berg. Områden som måste beaktas är bl a följande:

- . Värmeförhållanden i berget - temperaturfördelning och värmeförluster
- . Inverkan på bergstabiliteten av olika fysikaliska-mekaniska effekter i berget på grund av varmt vatten, övertryck samt varierande temperatur. Olika förstärknings- och tätningsåtgärder.
- . Förändringar av kemisk natur hos berg och lagringsvatten.
- . Inverkan på omgivningen, främst grundvattnet.

4 BESKRIVNING AV FORSKNINGSPROJEKTET

Forskningsprojektet "Lagring och transport av vattenburen värme i berg" avses bli genomfört i följande fyra etapper, varav Etapp I och II är idag i stort slutförda.

Etapp I Inventering och analys av olika bergtekniska problem och svårigheter, som kan uppstå vid lagring eller transport av varmt vatten i berg. Begränsad laboratorieprovning beträffande hetvatteninverkan på leror, mineraler och bergarter samt betong.

- Etapp II** Fältförsök för utvärdering in-situ av värmespridning och temperaturfördelning, termospanningar samt lagringsvattnets kemi, bergets täthet m m.
- Mätningar i berget kring ett 50 000 m³ oljelager i Marviken med 50°C olja samt kring ett 20 m långt grovborrhål (Ø 30 cm) i vilket cirkulerats vatten med upp till 110°C temperatur.
- Etapp III** Förstudier för eventuella försök i full skala med energilagring respektive varmvattentransport i berg. I dessa utredningar avses den ekonomiska potentialen hos direkt bergtunneltransport av varmvatten respektive berglagring grundligt studeras i ett större sammanhang samtidigt som de tekniska lösningarna detaljstuderas. Ev. forskningsprogram för fullskaleförsök respektive uppföljningar i demonstrationsanläggningar.
- Etapp IV** Avser ev. genomförande av fullskaleförsök i fält sannolikt dels i en försökstunnel i ett befintligt fjärrdistributionsnät, dels i en verklig "demonstrationsanläggning" vid ett kraftvärmeverk.

5 VÄSENTLIGA RESULTAT I TIDIGARE ARBETEN (ETAPP I)

BeFo har sedan 1971 arbetat med olika frågeställningar i samband med hetvattenlagring i berg. Arbetet i etapp I har bestått i teoretiska analyser, litteraturgenomgångar samt försök i laboratorium (jfr avsnitt 3) har samlat redovisats i rapporten "Hetvattenlagring i bergrum. Bergtekniska konsekvenser av lagring av varmt vatten i oinklädda bergutrymmen" (9).

I rapporten presenteras resultat av värmespridningsberäkningar för bergmassan runt en hetvattenackumulator, se fig 3. Härvid har värden på värmeledningstal och värmekapacitet antagits med ledning av litteraturstudier och några få laboratorieförsök. Värmeövergångstalet mellan vatten och berg har uppskattats relativt grovt, eftersom få undersökningar av denna parameter finns i litteraturen. Värmeförlusterna till berget har också studerats.

Med ledning av temperaturberäkningarna har spänningstillståndet i berget efter 10 år beräknats för olika dygnsvariationer i hetvattentemperaturen, se fig 4. Härvid har antaganden fått göras om elasticitetsmodul,

tvärkontraktionstal och längdutvidgningskoefficient, varvid förutsatts att berget fungerat som elastiskt kontinuum. Endast delvis har man härvid haft stöd av litteraturuppgifter. Med hänsyn till den osäkerhet detta innebär, har frågan om temperaturspänningarnas eventuella skadlighet inte entydigt kunna bedömas.

En annan faktor som berörs i rapporten är spänningsrelaxionen närmast bergrumsväggarna. För en noggrannare analys av detta ur stabilitetssynpunkt viktiga problem hade krävts studier av de s k krypkonstanterna för berg vid förhöjda temperaturer.

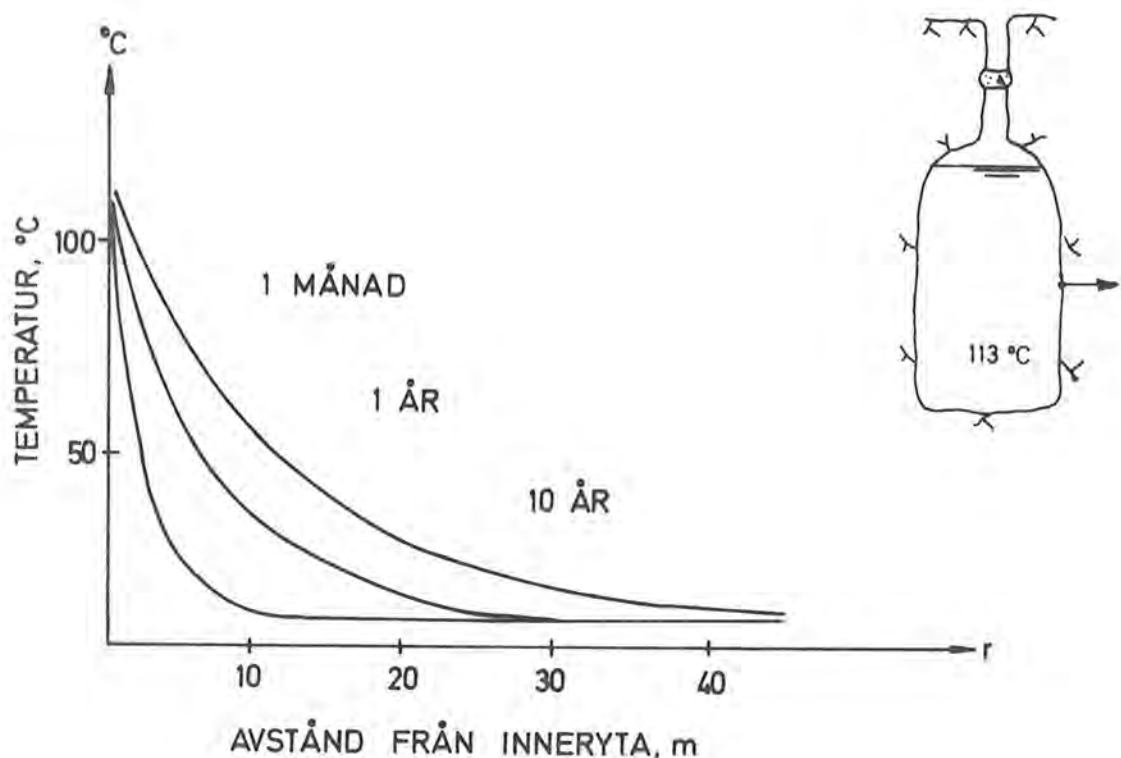


Fig 3 Temperaturfördelning i berget efter olika långa uppvärmningstider

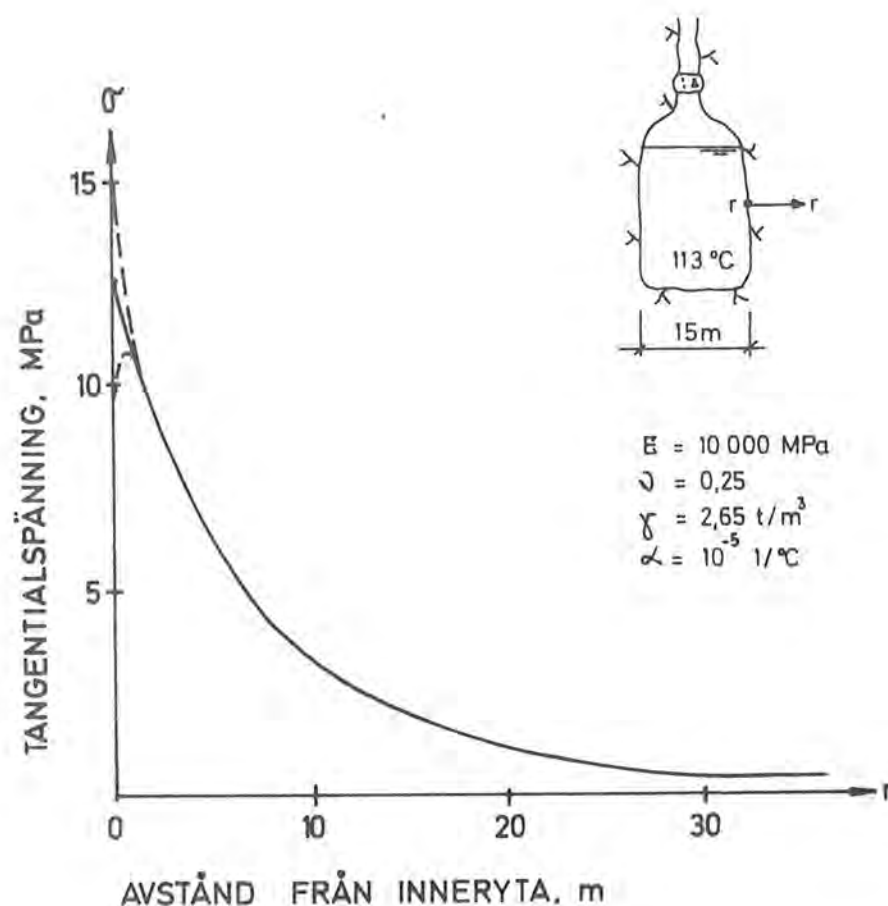


Fig 4 Spänningar i berget orsakade av bergets uppvärmning

Andra problemområden som studerats och diskuteras i rapporten är löslighet av bergmineral i hett vatten. Av mineralen syns det framför allt vara kvarts och karbonater som kan ha någon löslighet av betydelse vid de temperaturer det här är fråga om. I rapporten utreds också inverkan av hetvattnet på lerzoners mineralogiska- och hållfasthetsegenskaper. Det synes befogat att räkna med successiv hållfasthetsnedsättning i utsatta lerzoner, särskilt i zoner med aktiv lera. Reduktionen fortgår till en residualhållfasthet hos leran. BeFo-rapporten behandlar också bergförstärkning och tätning av tunnlar och bergrum för hetvatten samt inverkan på omgivningen av grundvattnet.

Resultatet av utfört arbete inom etapp I har sammanfattats i följande allmänna punkter:

- . inga bergtekniska fakta har framkommit som talar emot möjligheten att transportera eller lagra hetvatten i berg
- . vissa detaljfrågor, exempelvis värmeövergångstal vatten/berg och utlakningshastighet för bergartsmineral, måste ägnas fortsatt utredning i laboratorieskala
- . slutligt svar på kvarstående värmetekniska och bergtekniska frågor kan sannolikt snabbast ges genom att en första demonstrationsanläggning byggs.

6 UTFÖRDA UTREDNINGAR I ETAPP II

Utfört utredningsarbete i etapp I kännetecknas av en rad kvalitativa bedömningar beträffande olika effekter och svårigheter av bergteknisk natur som kan vara aktuella för en hetvattenackumulator i berg.

När det gäller att avgöra hur allvarliga många av de påvisade problemen kan vara är man dock föga hjälpt utan mätningar, som ger viss kvantifierande information beträffande väsentliga storheter. Då området är tidigare föga studerat bedömdes fältförsök under realistiska förhållanden vara en snabb och lämplig väg att få en uppfattning om storleksordningen och betydelsen för flera av dessa faktorer.

Värmeflödet i berget kring en varm kropp liksom bergmaterialets olika värmeegenskaper är självfallet av stor betydelse för driftsekonomin hos ett värmelager i berg, då de styr värmeförlusterna. Det har därför varit en angelägen uppgift att i största möjliga utsträckning pröva giltigheten i de teoretiska värmeberäkningar som tidigare utförts.

I bergalternativet spelar även värmeströmningen stor roll för bergstabiliteten, då rådande temperaturfördelning styr spänningar och rörelser i bergmanteln kring rummet.

För värdering av ett framtida värmelagers ekonomi och funktion är det sålunda viktigt att giltigheten hos dagens värderingsnormer grundligt prövas.

Stabilitetsförhållandena i berget kring ett stort uppvärmt bergrum är en av de väsentligaste frågorna, när det gäller att bedöma genomförbarheten av hetvattenlager i berg. Att med rimlig precision beräkna de påkänningar, som berget utsättes för vid uppvärmning och konsekvenserna härav, låter sig svårligen idag göras på teoretisk väg. Pågående forskning beträffande förbättrade datorprogram och bättre fältundersökningsmetoder kan i framtiden ge bättre möjligheter att beräkna stabiliteten.

Som en följd härav råder det idag tämligen delade meningar om storleken hos och riskerna med dessa spänningstillskott på grund av uppvärmning. Likaså råder mycket varierande uppfattningar om hur omfattande den uppluckringszon kan bli, som beror av varierande temperatur ("tillmakningseffekter").

Genom att koppla samman temperaturmätningar och relativa spänningmätningar har man i utförda studier försökt att ange och prova olika metoder att studera sambanden mellan bergtemperatur och bergstabilitet samt även belysa storleksordningen av dessa spänningar.

För driftssäkerheten spelar lagringsvattnets kemiska sammansättning stor roll. Genom varierande temperatur hos lagringsvattnet i rum och värmeväxlare kan olika mineral utlösas/utfällas i rummet och värmeväxlare. Likaså kan inläckande grundvatten ogynnsamt påverka lagringsvattnets kvalitet. Genom noggranna kemiska analyser av in- och utgående vatten har man i studien fått möjlighet att bedöma dessa frågor under verklig-hetstrogna förhållanden.

För att belysa ovannämnda förhållanden har som tidigare nämnts genomförts två större fältförsök, dels vid ett oljelager i Marviken, dels i ett grovborrhål i en fjärrvärmestunnel i Stockholm. I de s k "Marviksförsöken" har värmeffödet och i begränsad utsträckning bergspänningarna kunnat studeras i full skala under dokumenterade geologiska- och värmetekniska förhållanden.

I "borrhålsförsöken" har samma förhållanden studerats i mindre skala men under något bättre försöksbetingelser, bl a ger borrhålet en väl definierad försöksgeometri. Härutöver har det varit möjligt att undersöka förhållandena vid varierande vattentemperatur samt belysa frågor som rör bergets täthet, samspel lagringsvatten/grundvatten samt förändringar i lagringsvattnets kemiska beskaffenhet.

Utförda försök är redovisade i en rad arbetsrapporter, se avsnitt 11.

För detaljinformation hänvisas till dessa specialrapporter, som är tillgängliga på BeFo.

7 MÄTNINGAR I OLJELAGER VID MARVIKENS KRAFTSTATION

7.1 Orientering

Av allmänt förekommande byggnadsverk i berg är uppvärmda tjockoljelager de som ur bergmekanisk synpunkt mest liknar ett värmelager i berg. I sådana oljelager erbjuds möjlighet att förhållandevis realistiskt och i full skala studera olika effekter i samspelet mellan varm lagringsprodukt och omgivande berg.

Viktiga dimensioner är av ungefär samma storleksordning, medan driftstemperaturen är lägre och mer konstant för oljelagret än för hetvattenackumulatoren. Detta innebär, att man vid försök i ett oljelager inte får så krävande betingelser, som vore önskvärt för fullgod jämförelse med ett hetvattenlager. Av erfarenhet vet man dock, att det i uppvärmda oljelager förekommit skador, vilka bedömts åtminstone delvis berott på inverkan av temperaturspänningar.

För att studera nämnda frågor har temperatur- och vissa spänningsmätningar utförts vid det bergoljelager, som förser Marvikens oljekraftverk med olja.

Avsikten med dessa försök har främst varit att belysa de möjligheter man har att i fält studera olika faktorer som rör de värmetekniska förhållandena och bergrummets stabilitet. I begränsad utsträckning har avsikten också varit att ge storleksordningen för dessa.

I tidigare arbeten i projektet har dessa frågor redovisats utifrån teoretiska beräkningar som baserat sig på antagna beräkningsdata, vars giltighet varit föga prövad.

Genom att mäta temperaturen i berget kring rummet i olika punkter samt uppskatta rådande bergspänningar och ev. rörelser i bergmanteln bedömdes det även möjligt att pröva tillförlitligheten i dessa teoretiska beräkningar.

Bergrummet i Marviken är avsett för lagring av 50 000 m³ tjock eldningsolja. Dimensionerna framgår av fig 5. För att oljan skall vara pumpbar måste den hållas uppvärmd till ca 45 - 50°C. Oljan flyter på en fast vattenbädd på botten av rummet.

I Marviken har i huvudsak följande undersökningar och mätningar utförts:

- . Geologisk kartering genom okulärundersökning och bildtolkning.

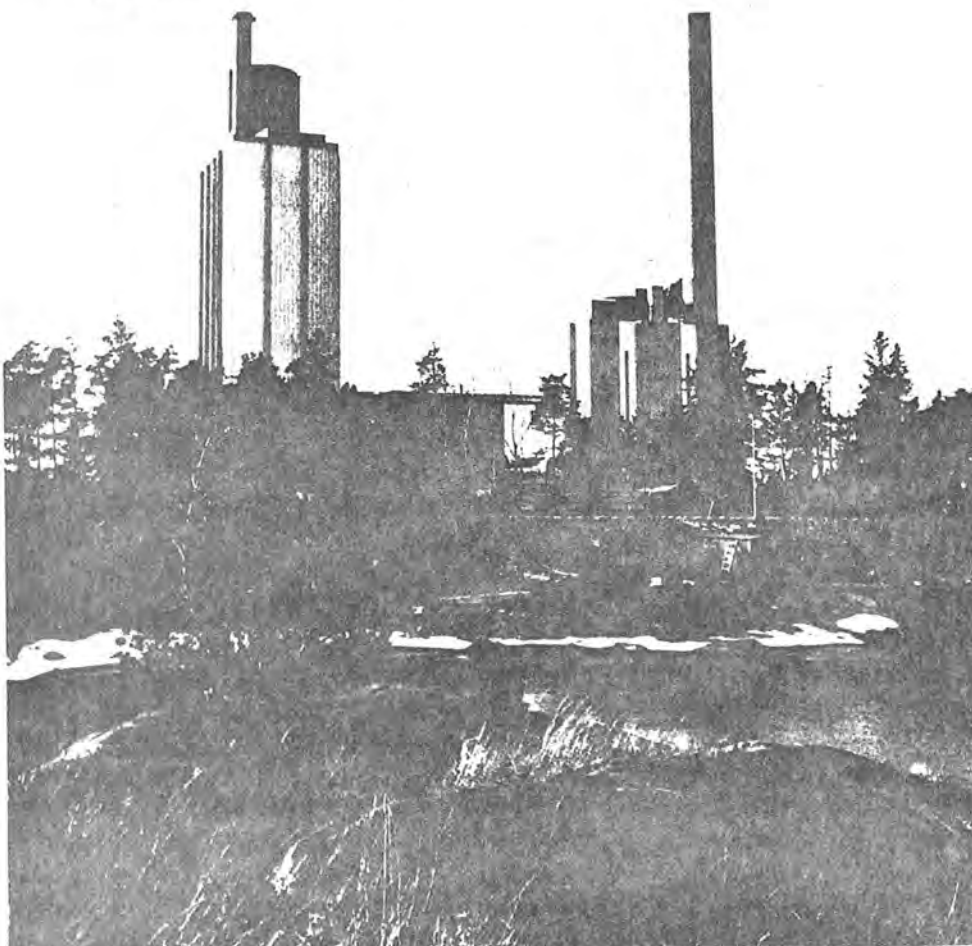
- . Fotogrammetrisk kartläggning
- . Temperaturmätning i rum och berg
- . Mätning av absoluta och relativa bergspänningar

7.2 Geologi. Kartering av bergtekniska förhållanden

Statens Geotekniska Institut har i "Geologisk dokumentation av oljelagringsrum i Marviken" 1974-05-30 beskrivit de geologiska förhållandena (2). Den geologiska karteringen har skett dels som direkt observation på platsen, dels som bildtolkning av fotografier i svartvitt och färg.

Bergrummet är till större delen beläget i en tämligen homogen diorit. I östligaste delen av rummet förekommer dock en svagt skiffrig gnejsgranit. I bergrummet förekommer inga större svaghetszoner och rummet är i huvudsak genomsett av två brantstående och mot varandra vinkelräta spricksystem av måttlig intensitet.

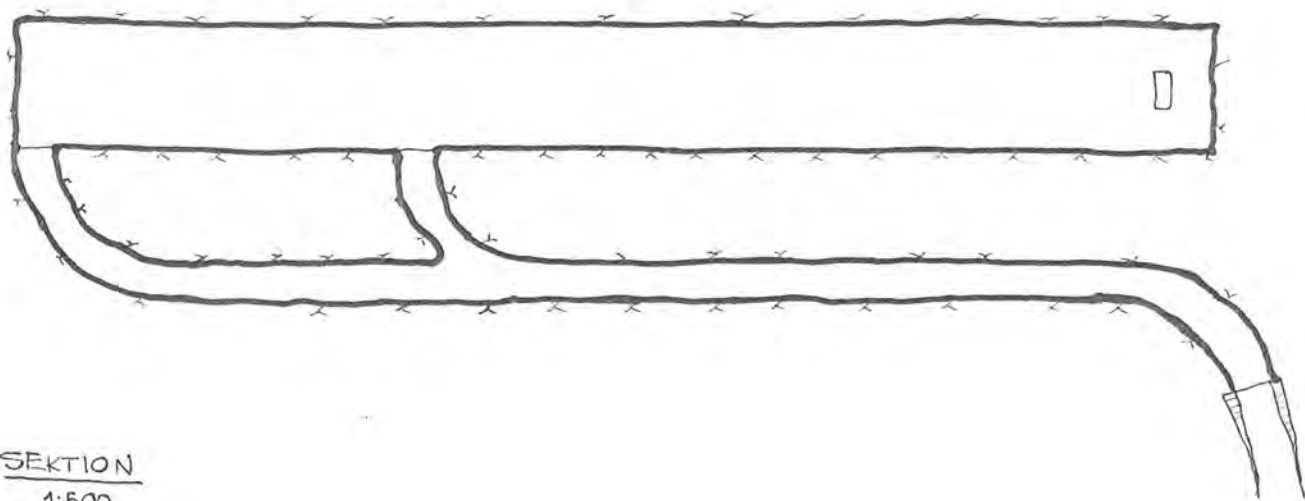
En noggrann fotogrammetrisk kartläggning har skett av tak och väggar. Avsikten är att i fall av inträffade skador en förnyad fotografering skall kunna ske. Genom jämförelse mellan de gamla och de nya bildserierna skall man ha möjlighet att observera förskjutningar och platser för eventuella nedfall av bergstycken.



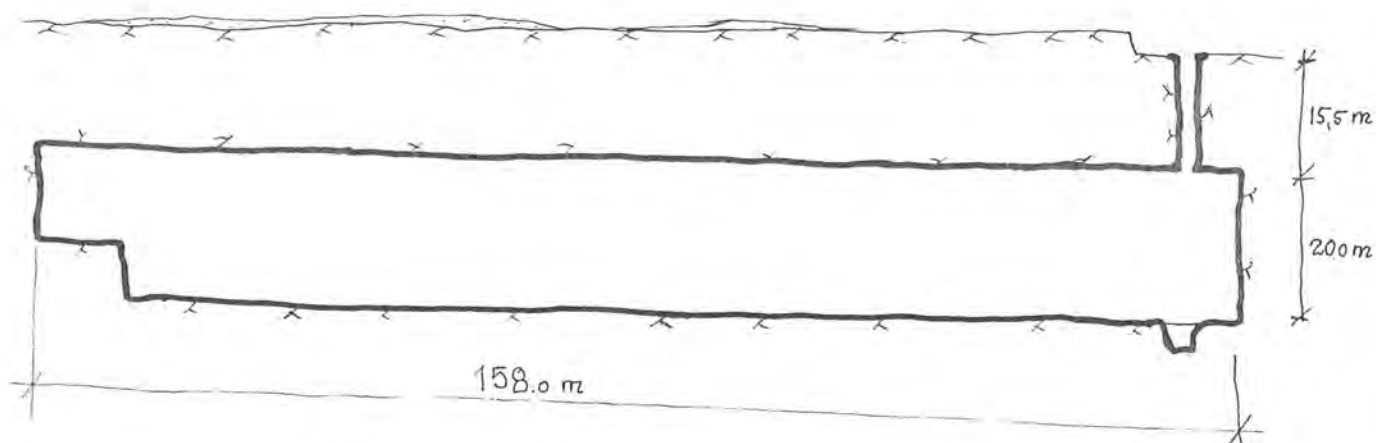
Marvikens
oljekraftverk

PLAN
1:500

20



SEKTION
1:500



TVÄRSEKTION
1:200

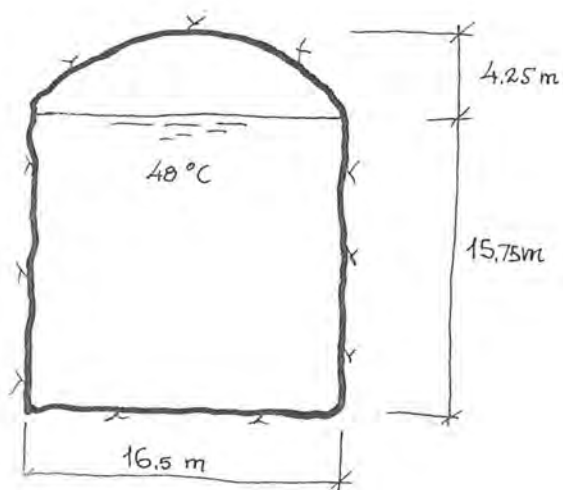


Fig 5 Lagringsrum i berg för uppvärmd tjockolja, Marviken

7.3 Mätinstallationer och genomförande

I bergpartiet mellan markytan och rummets tak har mätutrustningen placerats, fig 6. Mätningarna utfördes inom ett cirka 40 m långt parti kring mitten av bergrummet. Man har där en relativt homogen bergmassa, och man befinner sig långt ifrån störningar från gavlarna och ledningsschaktet, som går upp till markytan.

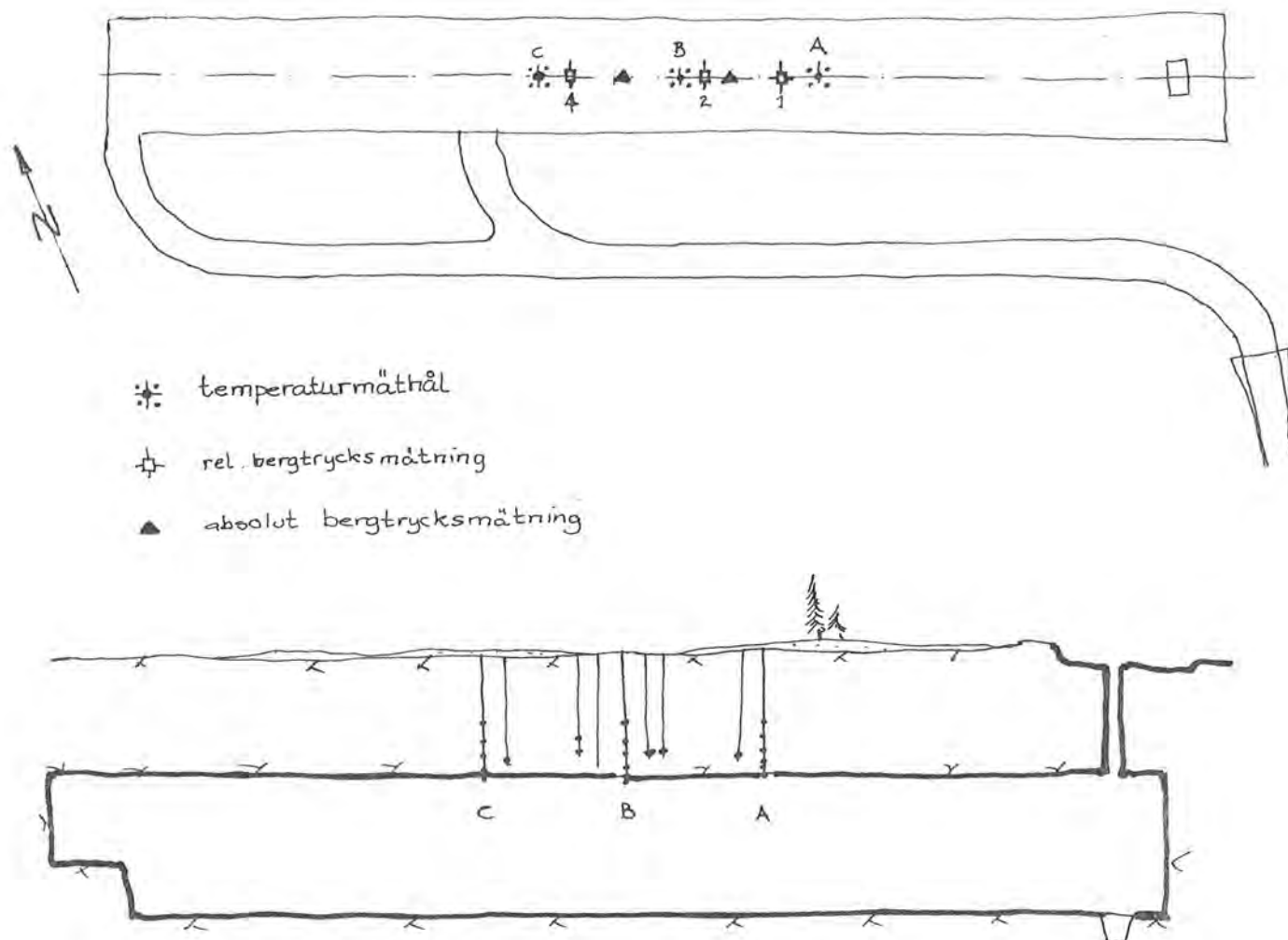


Fig 6 Mätinstallationer i Marviken

7.3.1 Temperaturmätning

Temperaturen i bergmassan kring oljelagret har mätts i tre sektioner och på sex olika nivåer ovan bergrummets tak. Mätsektioner och mätnivåer visas på fig 6 och 7. Mätningen har skett på elektrisk väg med motståndstermometrar, jfr fig 7. Mätkropparna hade placerats i vertikala borrhål borrarade från markytan. Ledningarna var dragna till en central mätstation.

För att undvika värmeströmning i borrhålen tvärs isotermerna hade dessa fyllts med sand. Före monteringen kontrollerades och kalibrerades varje mätare för temperaturintervallet 10 - 50°C.

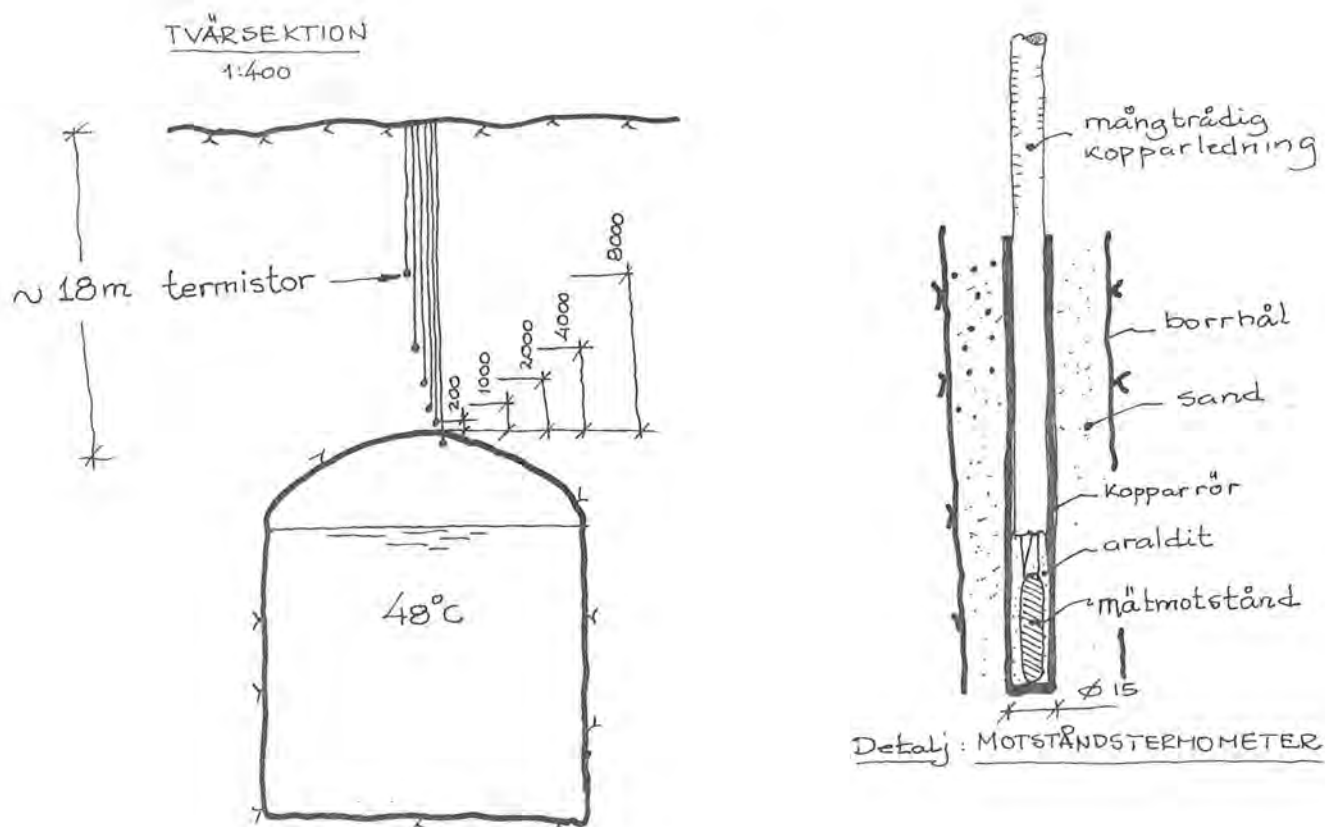


Fig 7 Motståndstermometrar för mätning av temperatur i berget

7.3.2 Absolut bergspänningsmätning

Den initiala spänningsnivån i bergpartiet ovan rummet bestämdes genom s k absolut spänningsmätning. Mätningen skedde före uppvärmningen, men efter utsprängning av bergrummet.

Mätningen genomfördes med en modifierad Leeman-metod, den s k "hålbotten-friborrningsmetoden" (typ Hiltcher/Vattenfall). Mätprincipen friborrningsmetoden visas på fig 8. Detaljer beträffande metoden och mätförfarandet är redovisade av Hiltcher 1973 (10).

Mätningarna skedde i två hål borrade från markytan med läge enligt fig 6. Tre mätningar har utförts i området 1 - 2 m ovan bergtaket.

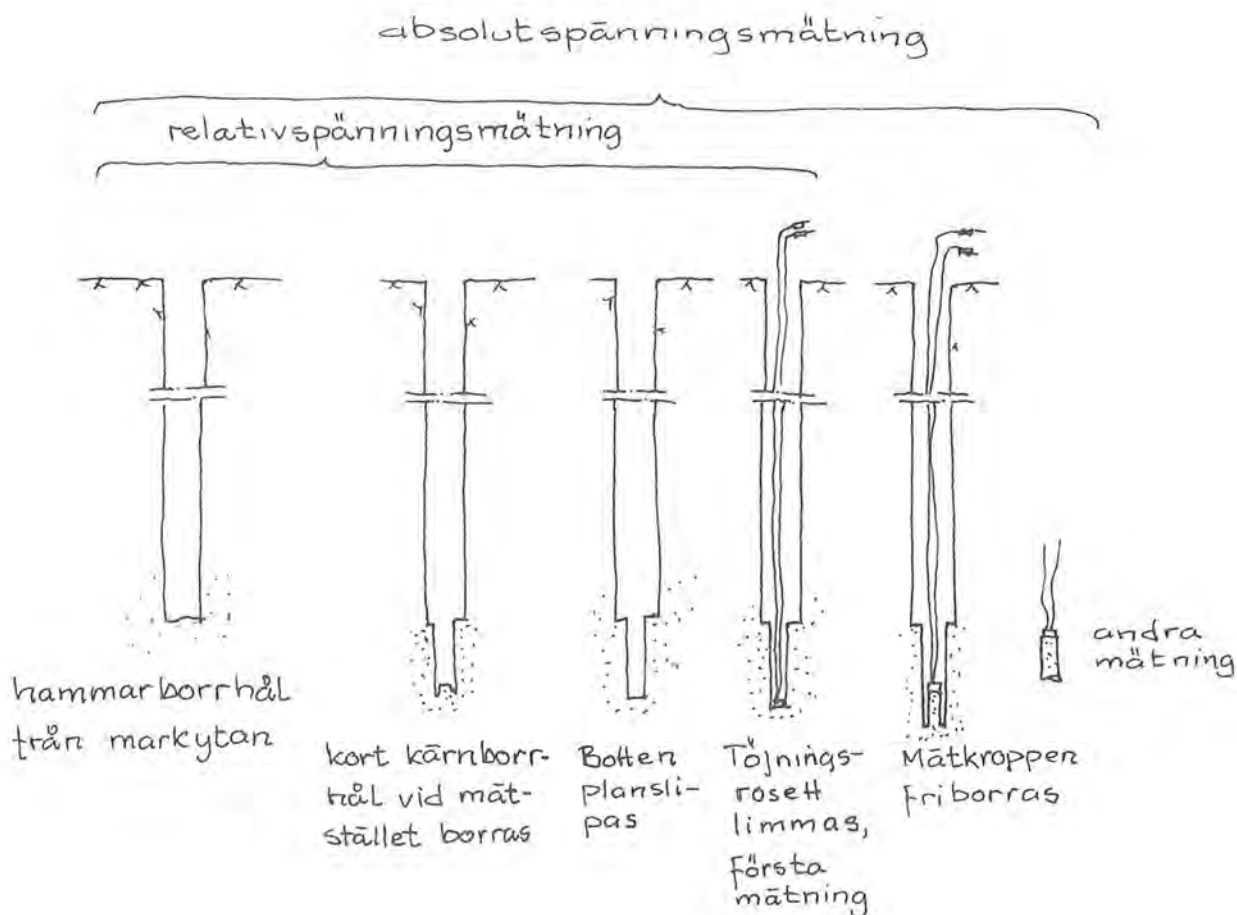


Fig 8 Princip för använd absolutspänningsmätning (Hiltcher - Vattenfall)

7.3.3 Relativ bergspänningsmätning

För att följa den spänningsändring som sker i berget vid uppvärmning installerades tre stycken magnetostriktiva bergtrycksceller i borrhål ("Hast-celler").

Cellerna placerades på botten av vertikala hål ca 0,5 m över bergrummets tak, jfr fig 6. Från cellerna var ledningar dragna till en central mätstation. Metoden och mätförfarandet är beskrivna av bl a Hiltcher 1973 (10).

7.4 Uppvärmning av oljelagret och berget

Innan den första oljan pumpades in hade bergpartierna närmast rummet uppvärmts genom att bäddvattnet cirkulerats genom en värmepanna. Från utgångstemperaturen $+8^{\circ}\text{C}$ höjdes rumstemperaturen cirka 30° under den första värmningsmånaden och cirka 10° under den andra månaden, varefter man hade uppnått normal driftstemperatur, jfr bilaga 1. Inpumpningen av olja kunde således börja under andra värmningsmånaden. Cirka 5 månader efter uppvärmningens början var rummet helt fyllt med olja.

Denna förhållandevis långsamma uppvärmning ansågs ej utsetta berget för värmechock med åtföljande risk för ogynnsamma spänningar i rummets ytpartier och nedfall.

7.5 Mätresultat

7.5.1 Temperaturmätningar

Resultaten från temperaturmätningarna i de tre mätsektionerna har sammanfattats på fig 10. Grundmaterialet från de 18 mätpunkterna redovisas i bilaga 1 i form av veckoavläsningar. Mätningarna som pågått under mer än 3 år har givit en god bild av värmespridningen i berget, jfr fig 9. Använda mätare har visat sig fungera bra, mätresultaten bedöms tillförlitliga och är i allmänhet jämna och förtroendeingivande. Några mätvärden är dock uppenbart oriktiga och i två fall visar mätarna för höga värden. Förutom instrumentfel, kan värmeströmning i mät hålet eller bergsprickor ha bidragit.

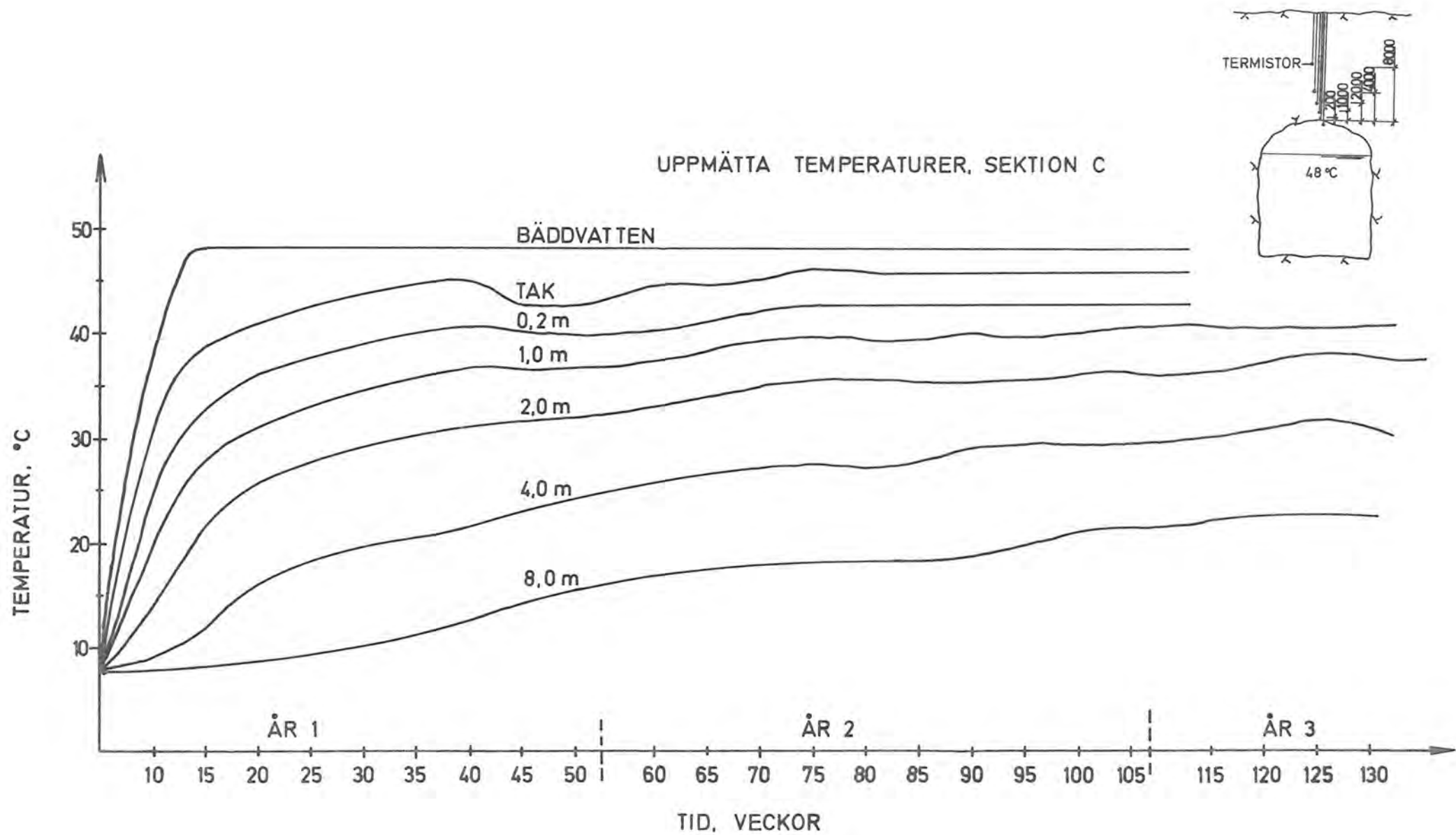


Fig 9 Uppmätta temperaturer i bergrumstaket, mätsektion C

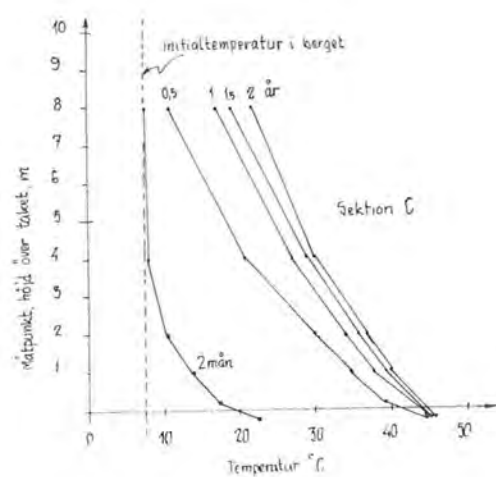
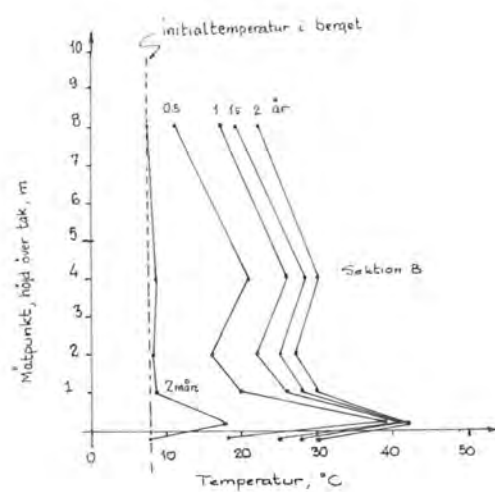
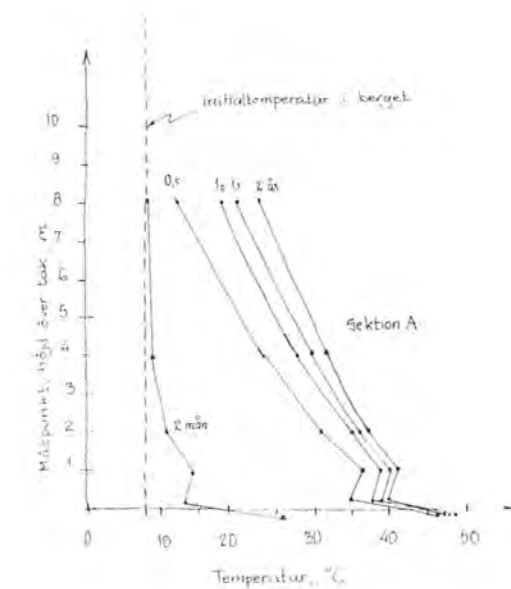


Fig 10 Uppmätta temperaturer i sektion A, B och C

7.5.2 Bergspänningsmätningar

Absolutspänningsmätningar

Ur mätningarna av absoluta spänningen har de tre huvudspänningarna σ_1 , σ_2 och σ_3 beräknats i de tre mät-punkterna samt elevationsvinkeln α mot horisontalplanet och spänningarnas kompassriktning K.

Spänningsberäkningen har baserats på en E-modul hos bergkärnor bestämd vid efterkalibrering till 80 GPa.

Resultaten av spänningsberäkningarna har sammanfattats i tabell 1.

Ur vissa observationer vid mätningen framgår, att det tektoniska spänningstillståndet, vilket man är ute efter, överlagras av lokala egenspanningar, vilka man samtidigt utlöser vid friborrningen och vilka inte kan separeras från de tektoniska spänningarna.

En efterkalibrering av de friborrade bergkärnorna med påsittande givare visade att samtliga givare fungerade bra och att spänningstöjningssambandet för berget var linjärt. För mätpunkt S1 hade man dock efter friborrningen konstaterat en kraftig krypning (vattenintrång?) av några givare, så att mätningen inte kan anses vara tillförlitlig.

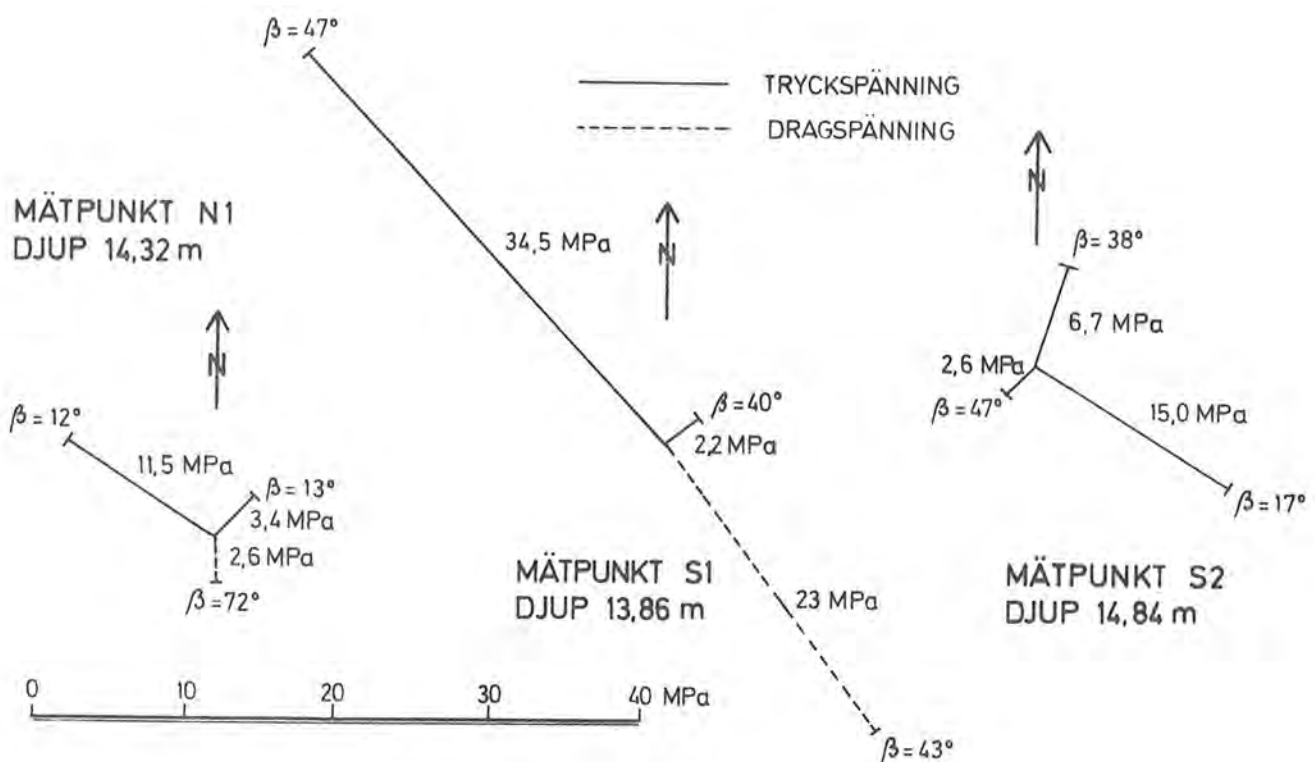
Ur de resterande mätningarna N1 och S2 (jfr fig 6) kan man dock dra slutsatsen att man i ungefär NW-SO-riktning har en tryckspänning av storleken $\sigma_3 = -10 - 15$ MPa, vilken i stort sett, ligger horisontellt. (För punkt N1 lutar den uppåt 12° mot NV, för punkt S2 uppåt 17° mot SO). I de övriga riktningarna i horisontalplanet är tryckspänningen av mindre storlek.

Inverkan av dessa spänningar på oljelagrets bergtak är inte särskilt stor, den maximala tryckspänningen ligger i skeppets längdriktning. Spänningsförhållandena är dock för bergtaket inte ogynnsamma, eftersom man åtminstone har måttliga tryckspänningar vinkelrät mot bergrummets axel, vilka underlättar att ett valv utbildas.

Tabell I Huvudspänningar $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ och deras elevationsvinkel β och kompasstal K för de olika mätpunkterna.

Mätpunkt		N 1	S 1	S 2
Huvudspänning	σ_1	2,6 MPa	23 MPa	-2,6 MPa
elevationsvinkel	β_1	72°	43°	47°
kompasstal	K_1	172°	147°	231°
Huvudspänning	σ_2	-3,4 MPa	-2,2 MPa	-6,7 MPa
elevationsvinkel	β_2	13°	4°	38°
kompasstal	K_2	37°	54°	18°
Huvudspänning	σ_3	-11,5 MPa	-34,6 MPa	-15 MPa
elevationsvinkel	β_3	12°	47°	17°
kompasstal	K_3	304°	320°	122°

Diagram visande huvudspänningarna $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ nedfälllda (ej projicerade) i horisontalplanet



Relativa bergspänningsmätningar

Av installerade tre celler för mätning av relativa bergspänningar har endast en lämnat regelbundna värden. Övriga två har lämnat mycket varierande värden under långa tider. Detta behöver inte betyda att mätarna ej fungerar, även om installations- och instrumentfel lätt kan uppstå, då berget självt kan ge oregelbundna värden. Särskilt i uppsprucket berg kan man förvänta sig mycket stora spänningsvariationer. Den troligaste orsaken till de oregelbundna mätvärdena är sålunda att mätarna hamnat i ett allt för uppsprucket bergparti i rumstaket. För att kunna indikera de tämligen stora och intressanta spänningsändringarna i bergmantelytan hade mätarna nämligen placerats i berget så nära taknivån som möjligt.

Mätresultaten har redovisats i fig 11 och bilaga 2. I figuren har avläsningsvärdena omräknats till spänningsökning i bergmassan på grund av uppvärmningen. Utvärdering av dessa mätningar är tämligen komplicerad, särskilt med hänsyn till den varierande temperaturen. För att komma undan inverkan av en rad faktorer kalibreras normalt cellen i ett enaxligt belastat block. Man kalibrerar alltså kända spänningsvärden i provblocket mot i fält avlästa "fiktiva" värden. Vanligen nyttjas ett block av stål, som sedan omräknas till "bergvärden" med hjälp av en korrektionsfaktor, som är i det närmaste proportionell mot bergets E-modul.

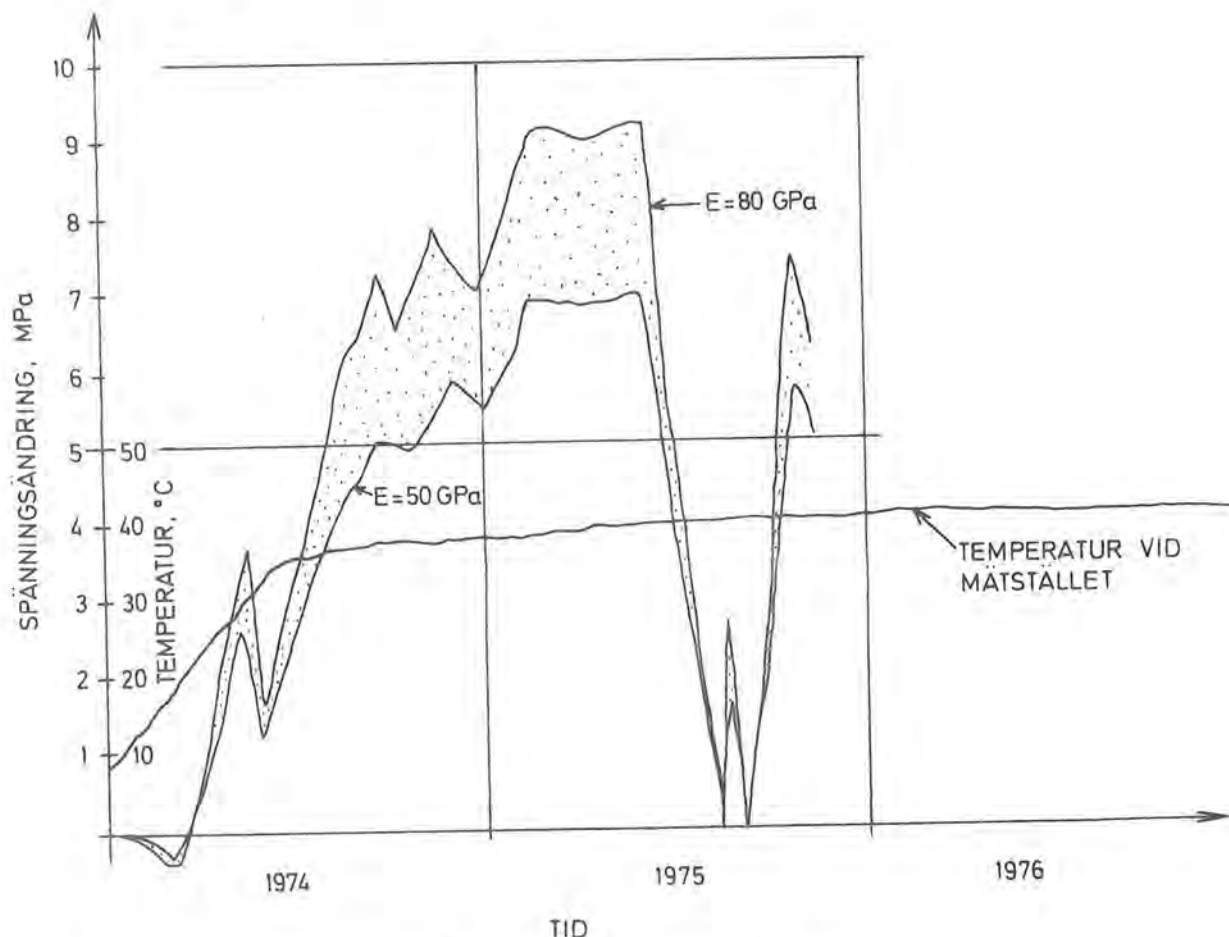


Fig 11 Utvärdering av spänningsändring vid uppvärmning

Den komplikation som uppvärmningen innebär bl a med hänsyn till mätcellens temperaturutvidgning har av fabrikanten uppgivits att ej väsentligt påverka mätvärdena. Några kalibreringsförsök vid förhöjd temperatur har däremot ej utförts, varför mätvärdena troligen borde korrigeras något med hänsyn till skilda värmeutvidgningsförhållanden hos cell och berg.

Mätriktningen är en annan komplikation som bör beaktas. Utförda mätningar ger endast diameterförändringen i en riktning och är sålunda endast representativa för tilläggs-spänningarna i det fall man har ett homogent spänningsfält kring hålet. Detta är dock ett förhållandevis rimligt antagande, då takpartiet kan betraktas som en plan skiva med fast inspända begränsningar.

Mätvärdena kan med dessa reservationer omräknas till spänningar i berget, såvida man känner bergets E-modul. Erfarenheter från mindre försök och tillbakaräkningar indikerar att man i Marviken bör förvänta en elasticitetsmodul för berget mellan 30 - 80 GPa. Det högre värdet torde representera en övre gräns för svenskt hårt sprickigt berg vid låga spänningsnivåer.

7.6 Diskussion av Marvikenförsöken

7.6.1 Temperaturfördelning i berget

Temperaturmätningarna har som nämnts givit en förhållandevis god bild av värmeflödet och temperaturen i takpartiet ovan rummet. Det är därför meningsfullt att jämföra mätvärdena med teoretiskt beräknade värden, med ingångsvärden baserade på förhållandena i Marviken.

I fig 12 har sålunda medelvärden hos mätta temperaturer på olika avstånd från rummet jämförts med beräknade värden. Enkla 2-dimensionella datorberäkningar utifrån värmeledningsekvationen har utförts, där bergrummet ersatts med ett cirkulärt hål med oljelagrets omkrets och bergmanteln med en tjocklek motsvarande täckningen. I figuren har också angivits i fortfarighet resultaten av enkla endimensionella överslagsberäkningar, där takpartiet antas motsvara en plan skiva.

Beräkningen har utförts för två olika värmeövergångstal α mellan berget och mediet i rummet. För det fall att hela rummet är fyllt med olja torde α -värdet vara ca $250 \text{ W/m}^2\text{C}$. Om rummet är fyllt med luft torde ett α -värde av ca $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ vara mera korrekt. På modellens yttre cylindriska yta antages α -värdet vara ca $10 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Värmeledningsförmågan i berget har satts $\lambda = 3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
 och specifika värmekapaciteten $C = 2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$.

Berget har antagits ha en starttemperatur av 8°C . Samma temperatur har ytterluften antagits ha hela tiden. Innertemperaturen har förutsatts variera på samma sätt som den uppmätta innertemperaturen.

Av resultaten i fig 12 framgår att uppmätta och beräknade värden praktiskt taget sammanfaller i början av uppvärmningsperioden för $\alpha = 250 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Detta tyder på att man bör använda ett tämligen högt värde på värmeövergångstalet även för det luftfyllda rummet. Egenkonvektionen på grund av uppvärmningen samt kondensation av vattenånga på väggarna torde vara av stor betydelse härvidlag. Vid längre tider blir skillnaden mellan uppmätta och beräknade värden något större, dock max $4 - 5^\circ\text{C}$, ca 10 %. Nedsipprande kallt sprickvatten kan ha verkat avkylande på berget.

Felet kan beräkningsmässigt minskas i någon mån genom att bättre anpassa modellen till rådande geometrier.

Sammanfattningsvis kan man således konstatera att överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade värden är ur praktisk synpunkt acceptabel, även om man har använt sig av en mycket förenklad beräkningsmodell. Med en beräkningsmodell som noggrannare återger det aktuella bergrummet och den omgivande bergmassan torde god överensstämmelse kunna erhållas.

I fig 13 har ovannämnda värden och beräkningsförfarande nyttjats för beräkning av värmeförlust från ett lager med 100°C varmt vatten. I fortfarighetskedet, efter ca 2 år är värmeförlusten av samma storleksordning eller mindre än för motsvarande värmeisolerad tank ovan mark.

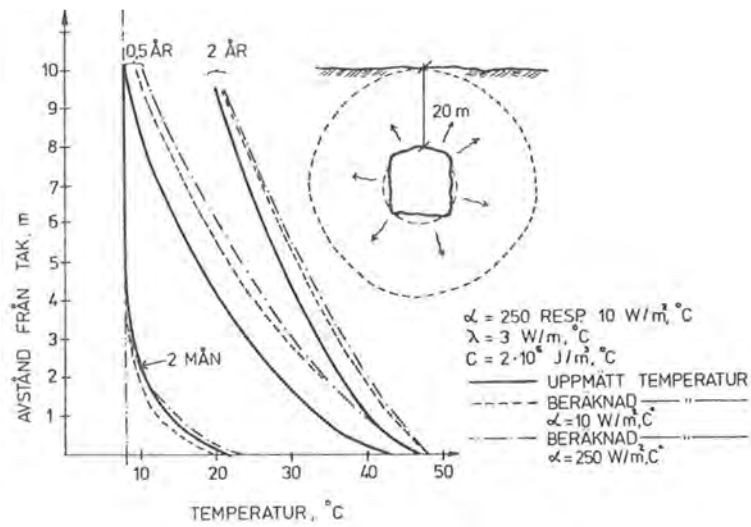


Fig 12 Uppmätt och beräknad temperatur i berget ovan värmelager

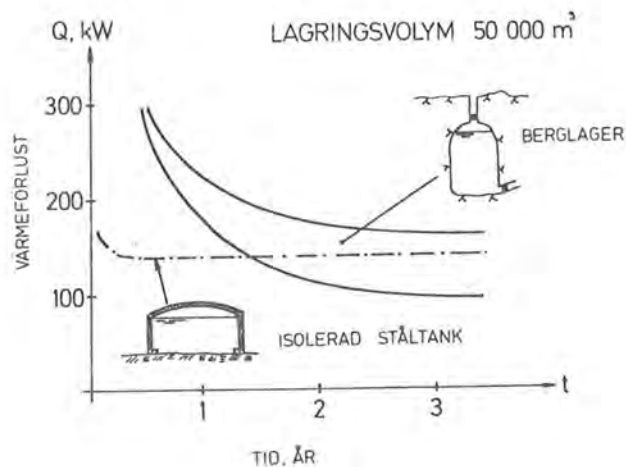


Fig 13 Värmeförlust från berglager med 100°C varm produkt

7.6.2 Bergspänningar

Den varma oljan uppvärmer berget närmast rummet mer än utanförliggande partier. Då berget ej har möjlighet att fritt utvidgas, kommer termiskt betingade spänningar att byggas upp i bergmanteln kring rummet. Storleken hos dessa tilläggsspänningar beror främst på rådande temperaturgradient, bergets värmeutvidgningskoefficient och bergmassans deformationsegenskaper, främst deformationsmodulen.

Uppbyggnaden av termiskt betingade spänningar i bergmanteln kring oljelagret har grovt analyserats i enkla överslagsberäkningar. Resultaten härav är dock avsevärt mycket osäkrare än temperaturberäkningarna, då spännings- och stabilitetsfrågorna är betydligt mer komplicerade. Bergmaterialets termiska längdutvidgning och deformationsmodul är helt avgörande för spännings-tillskottets storlek. Osäkerheterna i analysen beror främst på att dessa bergparametrar varierar lokalt ganska mycket, är anisotropa och spännings- och möjligen tidsberoende. Man kan sålunda - allmänt sett - endast under mycket gynnsamma förhållanden mäta spänningar och bergmaterialdata på ett tillförlitligt och representativt sätt.

Dessa frågor har ej systematiskt studerats, då projektet i första hand ju var avsett att studera metoder att mäta och övervaka spänningsändringar i berget vid varierande temperatur.

För att få en representativ bild av spänningsförhållandena krävs en mångfaldigt större satsning. En sådan större satsning planeras ske i anslutning till en framtida större demonstrationsanläggning.

Ursprunglig spänningsnivå i berget kring rummet

Utgångsläget vid Marviken har som redovisats i avsnitt 7.5 bestämts genom mätning i två borrhål i takpartiet ovanför bergrummet. Av tabell 1 avsnitt 7.5.2 framgår att spänningsbilden kännetecknas av tämligen små horisontella spänningar på upp till maximalt 10 MPa. Sannolikt är dessa spänningar i huvudsak knutna till egenspanningar i själva bergmaterialet. Man kan sålunda ej förvänta sig någon gynnsam stabilitetsbefrämjande effekt av dessa spänningar, då de troligen ej är tektoniskt betingade.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att de absoluta spänningsmätningarna antyder att det i stort endast råder gravitationsspänningar i berget kring rummet.

Spänningsändring på grund av ökad temperatur

De mätta temperaturberoende spänningsändringarna är som framgår av avsnitt 7.5.2 synnerligen osäkra.

De mest tillförlitliga värdena indikerar en spänningsökning i takpartiet på ca 7-9 MPa för en 30°C temperaturökning.

Det är intressant att jämföra detta uppmätta värde med teoretiskt beräknade värden baserade på antagna erfarenhetsvärden för aktuell typ av berg. Överväganden i bl a tidigare arbeten (9) visar att tämligen enkla överslagsberäkningar ger värden med rimlig precision. I exemplet nedan jämföres sålunda den uppmätta spänningen i berget med teoretiskt beräknade spänningar för ett fall där bergmanteln approximerats - på sedvanligt bergmekaniskt manér - med ett tjockväggigt rör.

De största spänningarna uppträder under anvärmningsperioden. Utgår man t ex från förhållandena efter 1 år kan man ur mätningarna konstatera att det skett en temperaturstegring på ca 30°C 1-1,5 m in i berget.

Antager man vidare på sätt som nämnts ovan att bergmanteln kan approximeras som en del av ett tjockväggigt rör med en tjocklek motsvarande täckningen erhålles

$$\sigma_t = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1 - \nu) \ln b/a} \left(1 - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \ln \frac{b}{a} \right)$$

där α = längdutvidgningskoefficienten, $(1 - 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}})$

E = bergets elastisitetsmodul (20 - 60 GPa)

ν = Poissons tal, (0,1 - 0,25)

ΔT = temperaturdifferens mellan inner- och yttervägg

a, b = radier (9,23) respektive 29,23, jfr fig 12)

Inom parentes har angivits bedömd storleksordning för bergparametrarna. Efter insättning i ekvation erhålles

$$\sigma_t = \frac{10^{-5} \cdot E \cdot 30}{2(1 - 0,25) \ln 3,1} = 4,11 \cdot 10^{-4} E$$

I aktuell typ av berg bedöms sålunda gränserna för E-modulen eller mer korrekt "bergets deformationsmodul" ligga mellan 20 - 60 GPa, dvs tilläggsspänningarna kan ligga någonstans mellan 8 - 24 MPa beroende på rådande deformationsmodul i berget.

Utgår man från de uppmätta spänningarna enl 7.5.2 kan man genom tillbakaräkning dra vissa om än mycket osäkra slutsatser betr bergets deformationsmodul kring mätplatsen i oljelagret. Utgår man från det uppmätta värdet, 7 - 9 MPa, ger formeln ovan att bergets deformationsmodul varierar mellan 15 - 30 GPa, under i övrigt konstanta förhållanden.

För högre temperaturer torde spänningsändringen öka en aning mer än proportionellt mot temperaturförändringen, då det är rimligt att antaga att bergmassans deformationsmodul ökar vid högre temperatur genom ökande spänningsnivå. Vid de låga temperaturer, som varit aktuella i Marviken, torde sprickorna i bergmassan ännu ej helt hunnit sluta sig.

För en hetvattenackumulator med exempelvis temperaturintervallet 85 - 135°C och medeltemperaturen ca 110°C bör storleksordningen för tangentialspänningarna i taket vara ca 2,5 à 3 gånger större än i oljelagret, dvs maximalt 20 - 30 MPa. Dessa i och för sig avsevärda spänningar torde ej överstiga bärförmågan hos

ett " normalt " berg. Däremot måste man räkna med enstaka mindre nedfall vid oregelbundenheter i ytan. Bergpartier med ogynnsamt orienterade sprickor och slag kan också komma att kräva särskilda förstärkningsåtgärder.

8 FÖRSÖK MED CIRKULERANDE UPPVÄRMT VATTEN I ETT GROVT BERGBORRHÅL

8.1 Bakgrund

Varmvattentransport direkt i bergtunnlar aktualiserar en mängd bergtekniska och andra frågor som måste utredas för att ge konstruktionsunderlag. Att i detalj utreda varje enskild fråga är ett mycket omfattande forskningsarbete. En bedömd möjlig och avsevärt snabbare väg är att pröva systemet i full skala i en demonstrationsanläggning. Man kan tänka sig att i ett befintligt fjärrvärmenät utspränga en parallelltunnel, i vilken varmt vatten periodvis överföres.

En omsorgsfull uppföljning av ett sådant fältförsök bedöms vid tillräckligt lång tunnelsträcka ge en god helhetsuppfattning om systemets möjligheter och ev. problem.

Ett fullständigt konstruktionsunderlag torde härutöver kräva kompletterande fördjupade studier av vissa specifika frågor. Försök i full skala i en bergtunnel måste föregås av omfattande förberedelser och förstudier.

Som en inledning till dessa studier har man studerat förhållandena kring ett grovt borrhål, i vilket varmt vatten av varierande temperatur cirkulerats i ett slutet system.

Syftet har främst varit att pröva och värdera olika förfaranden att mäta och tolka värmebetingade bergfaktorer samt att grovt belysa storleksordningen hos dessa. Dessutom avsåg försöken att ge erfarenhet beträffande handhavande av installationer för uppvärmning, avkylning och tryckhållning samt naturligtvis mätutrustningen.

I studien har i huvudsak följande frågor diskuterats:

- Temperatur- och värmeförhållanden

Värmeledning från och uppvärmning av berget kring ett varmvattenfyllt borrhål. Ackumulering av värme i omgivande bergmassa.

- Stabilitet

Ändringar i spänning och töjning i berget kring ett varmvattenfyllt bergborrhål vid uppvärmning och avsvalning av cirkulationsvattnet.

- Täthetsegenskaper

Vattenläckage från och till ett varmvattenfyllt borrhål vid varierande tryck och temperaturer. Utbyte med grundvatten i omgivande berg.

. Vattenkvalitet

Förändringar av varmvattens kemiska sammansättning vid cirkulation i ett bergborrhål.

. Vittring och nedbrytning

Förändringar av hålväggen i ett bergborrhål på grund av cirkulerande varmvatten. Urlakning av finmaterial ur krosszoner.

8.2 Försöksplats

Försöksplatsen var belägen i en fjärrvärmes tunnel i berget nära Uggleviksreservoiren i Stockholm. I en anslutande tunnelslinga ned till själva tunneln borrades ett grovt bergborrhål enligt fig 15. Försöksplatsen låg ca 20 m under markytan.

Berggrunden på försöksplatsen utgörs av två för Stockholmstrakten vanliga bergartstyper, nämligen grå fin-kornig granit och grå pegmatitlirig gnejs. Granitberget uppdelas i bergblock genom varandra nära nog vinkelrätt skärande brant stående sprickplan och horisontellt lig-gande bottenlag. Huvudriktningen på de brant stående sprickplanen är N65 W respektive N35 E. Bottenlagen lutar 10 - 20° mot nordväst. Gnejsens skiffrighetsriktning (strykning) i tunneln är nordväst-sydost och stupningarna branta 70 - 90°. Huvudsprickriktningen är parallell med gnejsens skiffrighet.

Granit-gnejsbergets sprickfrekvens inom det aktuella området bedöms vara normal för ifrågavarande bergarts-typer.

Bergkvaliteten kontrollerades även i ett 30 m djupt kärnborrhål som borrades parallellt med det planerade provhålet och på ett avstånd av 0,9 m från detta.

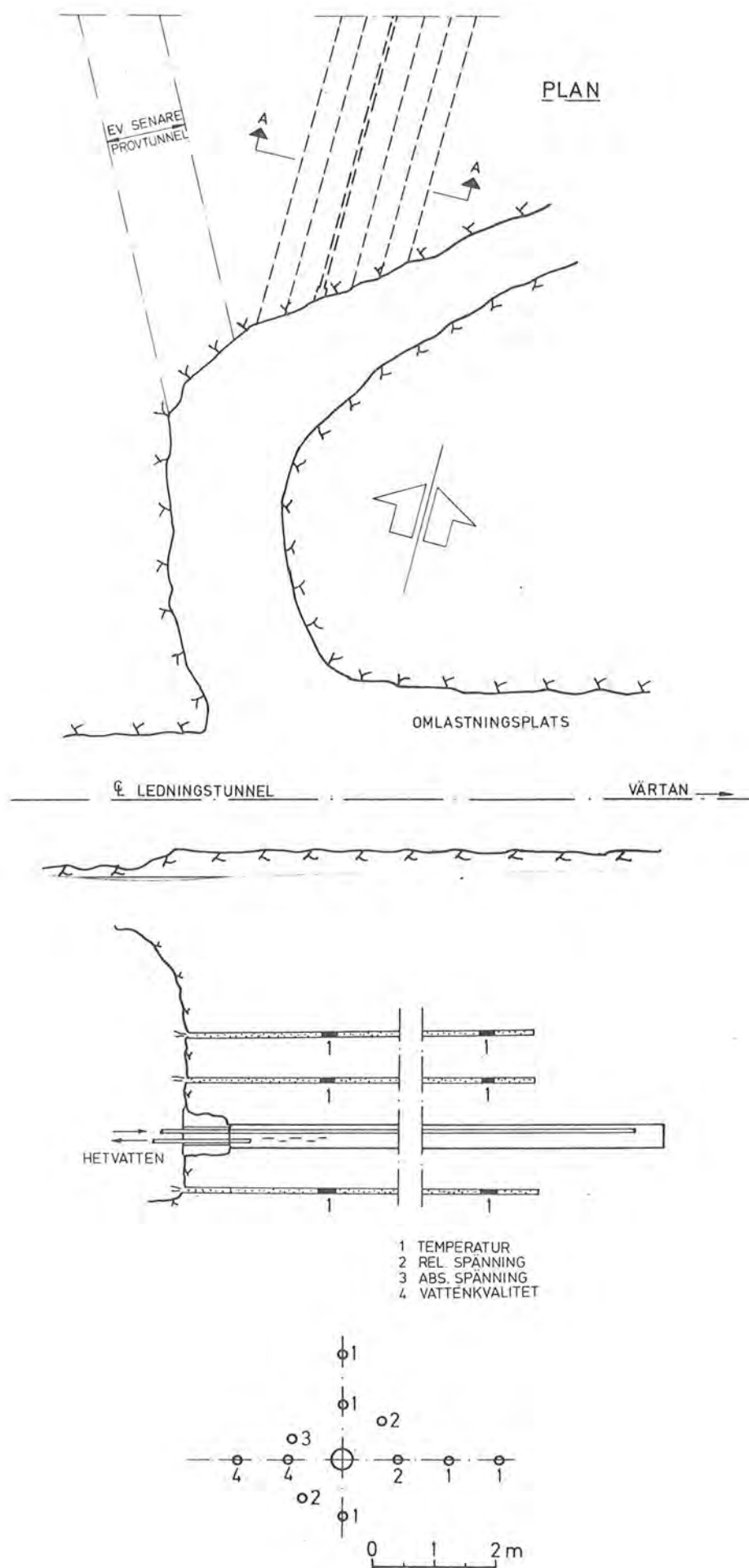


Fig 15 Försöksplats för försök med uppvärmt grovborrhål i tunnel

Den upptagna kärnan bestod av grå finkornig granit. Iakttagelser beträffande bergets kvalitet har sammanställts i följande tabell.

Djup m	Sprickor per m	Anmärkningar
0,00 - 5,00	1 - 2	
5,00 - 6,00	3	
6,00 - 8,00	berget genomsatt av sprickor, delvis uppkrossat	sprickorna rostbelagda. Tecken på begynnande vittring
8,00 - 15,80	2 - 3	
15,80 - 20,70	berget genomsatt av sprickor, delvis uppkrossat	sprickorna delvis kalcitfyllda
20,70 - 29,00	1 - 2	

8.3 Försöksanordning

Som framgår av fig 15 utfördes försöken i ett 20 m djupt horisontellt borrhål med 300 mm diameter. I hålets upprymda mynning göts en tät betongplugg, som förankrades i berget, jfr fig 17. Pluggen försågs med en centriskt belägen ställucka samt genomföringar för in- och utgående vatten.

Parallellt med detta grova hål borrades ett antal mindre hål för mätningar, enligt fig 17, varav ett av dessa utgjordes av ovan nämnda kärnborrhål.

En uppvärmningsanordning installerades bestående av två kretsar. I primärkretsen uppvärmdes vatten i en elpanna. Vattnet cirkulerades genom en värmeväxlare, där värmen överfördes till sekundärkretsens vatten, som cirkulerades genom hålet i berget.

Sekundärsystemet var fyllt med mälarvatten som tagits obehandlat vid Lovöverket. För detta ordnades en mindre förrådstank. Varmvattnet infördes i försöksutrymmet med ett kopparrör infört från hålets botten samt togs ut genom ett annat rör vid betongpluggen.

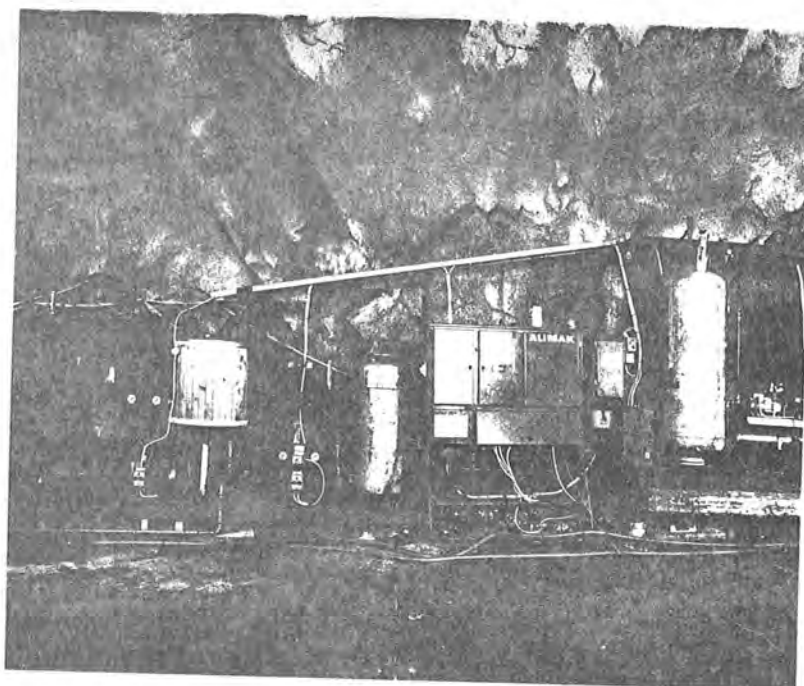
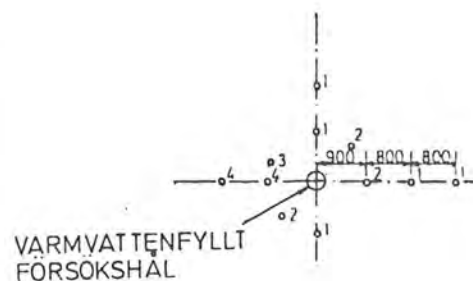


Fig 16 Installerade anordningar för uppvärmning och tryckhållning av cirkulationsvattnet

8.4 Mätutrustning och mätprogram

Temperaturen i berget kring borrhålet mättes i 15 punkter med hjälp av elektriska motståndstermometrar av samma typ som använts vid Marvikenförsöken, jfr avsnitt 7.3.1. Mätkropparnas placering i 5 hål framgår av fig 17. I varje hål var en mätkropp placerad på ca 7 m, 12 m och 17 m djup. Sedan mätkropparna satts in cementinjekterades hålet. Mätkropparna avlästes på elektrisk väg med ett centralt instrument normalt en gång per dag.

Temperaturen i det cirkulerande värmda vattnet avlästes med termometrar placerade på in- och utgående rör.



MÄTHÅL

HÅL NR	Ø mm	DJUP m	NR	MÄTÄNDAMÅL
1	40	18	5	TEMPERATUR
2	40	8-30	3	REL. SPÄNNING
3	-	14	1	ABS. SPÄNNING
4	40	18	2	VATTEN - KVALITET

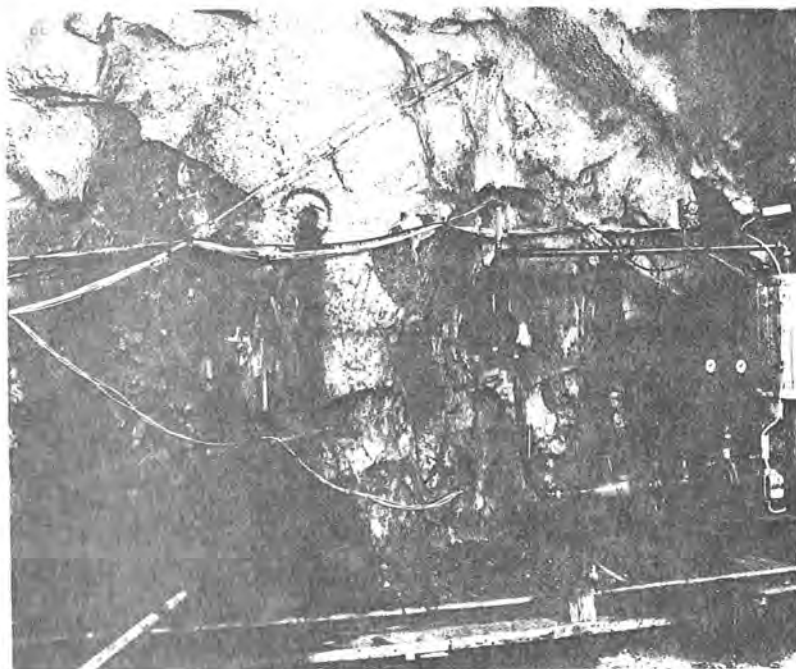


Fig 17 Installerade mätanordningar

Den absoluta spänningsnivån i bergpartiet i plan vinkelrätta mot borrhålet mättes i 6 nivåer med Vattenfalls skålbotten-friborrningsmetod (typ Hiltcher), jfr fig 8 och avsnitt 7.3.2. Mätningarna skedde i ett hål beläget 0,9 m från grovborrhålet och före uppvärmningen av berget.

I försöken har även prövats möjligheten att med denna cell mäta töjningsändringar hos berget vid varierande vattentemperatur. Efter avslutade absolutspänningsmätningar limmades en töjningsrosett på den avplanade borrhålsbotten på 13,80 m djup. De tre pålimmade givarna ger sålunda en fullständig bild av de töjningsändringar som sker i borrhålsbotten vid varierande vatten- och bergtemperaturer. Rosetten var skyddad mot vatten genom att

borrhålet var fyllt med silikonfett vid mätaren. Temperaturen vid mätpunkten mättes med en termistor belägen 10 cm från mätrosetten. Vissa temperaturskillnader kan sålunda råda mellan de skilda mätpunkterna för töjning och temperatur.

Spänningsändringarna under försöket mättes med relativ spänningsmätare, typ Johnson-cell. Dessa sk stela mätceller mäter töjningsändringarna med hjälp av i cellen inspända vibrerande trådar. Mätarna var placerade på ca 7 m, 14 m och 18 m djup i ett borrhål beläget 0,9 m från försökshålets centrum.

I två bergborrhål anordnades uttag för vattenprover för kemisk laboratorieanalys.

Innan försöken påbörjats granskades försökshålet med hjälp av TV-utrustning och resultaten registrerades på band.

En eftergranskning av hålväggarna avses bli utförd när försöksutrustningen slutgiltigt demonterats.

8.5 Försökens genomförande

Försöksprogrammet genomfördes under en 12-månaders period i princip enligt fig 17. Efter bestämning av bergets initialtemperatur ökades temperaturen hos vattnet i provhålet med ca 20° per vecka. Man strävade efter att hålla temperaturen konstant under 5 dagar i varje steg.

Efter 3-månaders uppvärmning hade provvattnet en temperatur på ca +100°C, som man försökte att bibehålla under ca 3 veckor.

För att förhindra kokning hos vattnet gjordes ett försök att öka trycket. Av misstag påfördes hastigt ett övertryck av omkring 0,1 MPa, varvid en stor del av provvattnet förlorades i bergets spricksystem. Även vid så lågt övertryck som 0,02 MPa visade det sig att vattnet ganska snabbt försvann i berget.

Man kunde konstatera att en del av vattnet kom ut i tunneln via sprickor i berget, speciellt genom de mät-hål, som borrarats parallellt med provhålet. När trycket togs bort visade det sig dock, att grundvattentrycket tog överhanden och vattnet steg i till systemet hörande tryckkärn. Erfarenheter från annat håll visar att i ett ytligt beläget berg med torra sprickor och av-sänkt grundvatten kan man ej förvänta gastätt berg, vilket ju konstaterats även här.

Temperaturen sänktes därefter i två steg till ca +12°, som hölls i ca en vecka. Temperaturen höjdes sedan

till nivåer mellan $+50^{\circ}$ och ca $+95^{\circ}$ med mellanliggande avkylningsperioder av mellan $+20^{\circ}$ och $+25^{\circ}$. Varje temperaturnivå och avkylningsperiod bibehölls under ca två veckor. Försöksserien avslutades med en höjning av provvattnets temperatur till $+110^{\circ}$. Denna temperatur hölls under ungefär en månad, varefter temperaturen sänktes till ca $+25^{\circ}$ efter ca 11 månaders försöksperiod.

Problem med utrustningen medförde att planerade renodlade temperaturförhållanden ej kunde hållas. Under mätperioden inträffade vissa smärre ej önskade variationer av vattentemperaturen i provhålet.

Varje arbetsdag under försökstiden har provvattnets temperatur, samt de i berget insatta temperatur- och relativtryckmätarna avlästs.

Bergspänningarnas absolutvärden bestämdes dels vid mätningar innan uppvärmningen påbörjats, dels vid några tillfällen under försökets gång.

Vattenprover togs före försökets igångsättande av mälarvattnet samt av det naturliga läckvattnet i berget. Under försökets gång togs prover kontinuerligt av det cirkulerande provvattnet samt läckvatten ur tappkranar i hål belägna 0,9 respektive 1,8 m från provhålets centrum.

8.6 Utvärdering av erhållna resultat

Temperaturmätningar

Resultaten av temperaturmätningarna har sammanfattats i fig 18. De enskilda mätpunkternas värden detaljredovisas i bilaga 3. Av figuren och bilagan framgår att de i berget uppmätta temperaturerna följer väl provvattentemperaturens växlingar.

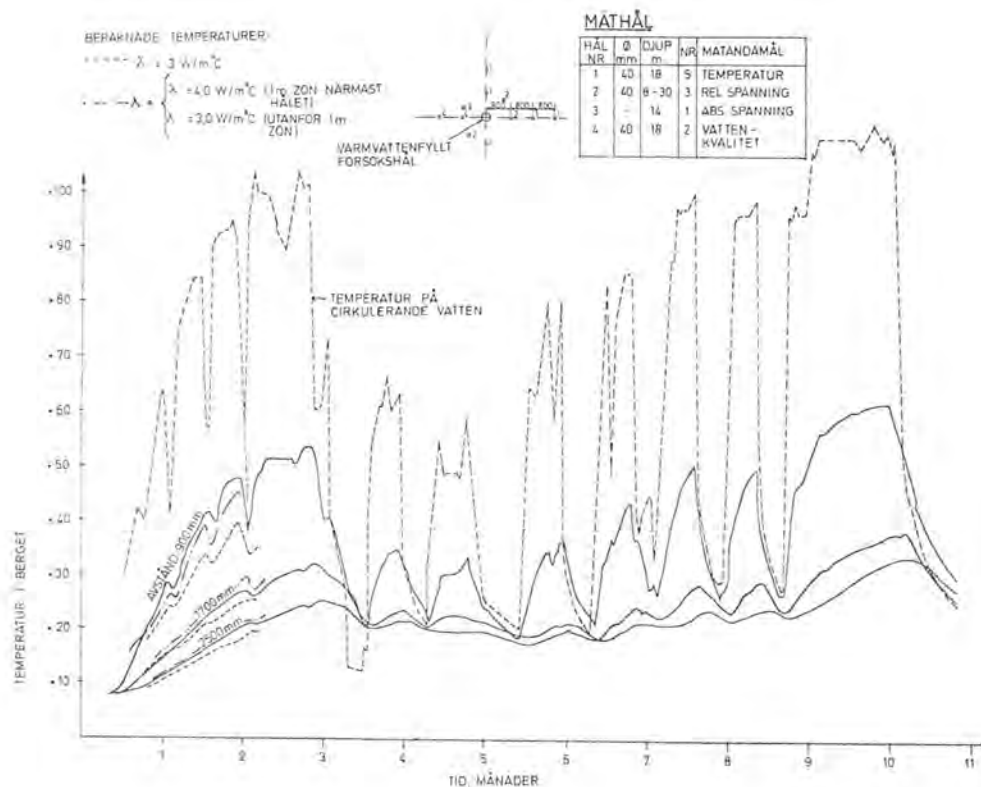


Fig 18 Medelvärde av uppmätta temperaturer på olika avstånd från försökshålet

Som framgår av bilaga är den uppmätta temperaturfördelningen ej symmetrisk kring försökshålet. Den naturliga förklaringen torde vara att sprickor i berget utgjort transportvägar för varmt vatten.

Spänningsmätningar

Absolutspänningsmätningar

Spänningstillståndet i berget kring borrhålet har registrerats i sex punkter längs detta före uppvärmningen. Uppmätta spänningar har ställts samman i nedanstående tabell II. De uppmätta spänningarna är varierande och förhållandevis små. Spänningsbilden är typisk för yt-

berg i en granitisk berggrund, där endast gravitations-spänningar råder. De uppmätta värdena torde i huvudsak vara att hänföra till egenspanningar i bergmaterialet, som dominerar när spänningsnivån ligger vid 10 MPa och därunder.

Tabell II Resultat av absoluta spänningsmätningar vid borrhålsförsök

Koordinatsystem:						
		$\sigma_1 = \text{--- --}$ tryckspänning +				
		$\sigma_2 = \text{---}$ dragspänning -				
Mät-punkt	Djup från vägg m	σ_1 MPa	σ_2 MPa	α σ_1 °	E-modul GPa	Anm.
1	5.45	0.6	5.3	4	89.0	Max.spänningsriktningen α har definierats positiv motsols och med utgångspunkt från en uppåtriktad vertikal
3	5.95	-4.4	8.2	18	85.0	
5	9.42	-4.5	9.1	12	$\left\{ \begin{array}{l} E_1 \\ E_2 \end{array} \right.$	
					93.0	
					43.0	
7	9.90	-5.9	16.4	18	94.6	
8	13.07	-0.6	2.5	16	79.7	
10	13.55	-0.5	1.0	-69	79.7	

Relativspänningsmätningar.

Spänningsändringarna under försöket har följts i tre punkter längs borrhålet. Mätavläsningarna ger via ett kalibreringsförfarande direkt "spänningen" över cellen. Fysikaliskt sett mäter man dock deformationen i hålet.

Inverkan av temperaturen på mätcellen har beaktats genom att avlästa värden temperaturkorrigerats med hänsyn till utförd värmekalibrering (11).

Uppmätta spänningar under försöken är redovisade i figurer 19, 20 och 21.

Mätpunkten J30, fig 19, visar oregelbundna och delvis omotiverade variationer i spänningarna. Detta torde bero på att en av mätriktningarna inte fungerat tillfredsställande. De slutsatser som kan dras av mätserien får därför behandlas med viss försiktighet. Under den första uppvärmningsperioden stiger temperaturen vid mätpunkten med 35° till temperaturen $+45^{\circ}$, därvid ökade den största spänningen σ_1 med 5,5 MPa, medan σ_2 endast visade en måttlig ökning. Under försökets 3 till 8 månader stiger bergmassans temperatur långsamt och temperaturvariationen i samband med uppvärmnings- och avkylningssyklerna uppgår till mellan 10° och 20° . Trots detta registrerades spänningsvariationer på upp till 2 MPa.

Vid den avslutande uppvärmningen till 110° i provhålet steg temperaturen vid mätstället från $+30^{\circ}$ till $+80^{\circ}$, därvid ökade den största spänningen med ca 60 kp/cm^2 .

Spänningsriktningen varierade kraftigt i samband med temperaturväxlingarna. Denna variation kan naturligtvis bero av spänningsomlagringar i berget, men instrumentfel kan ej helt uteslutas, varför mätvärdena bör anses osäkra.

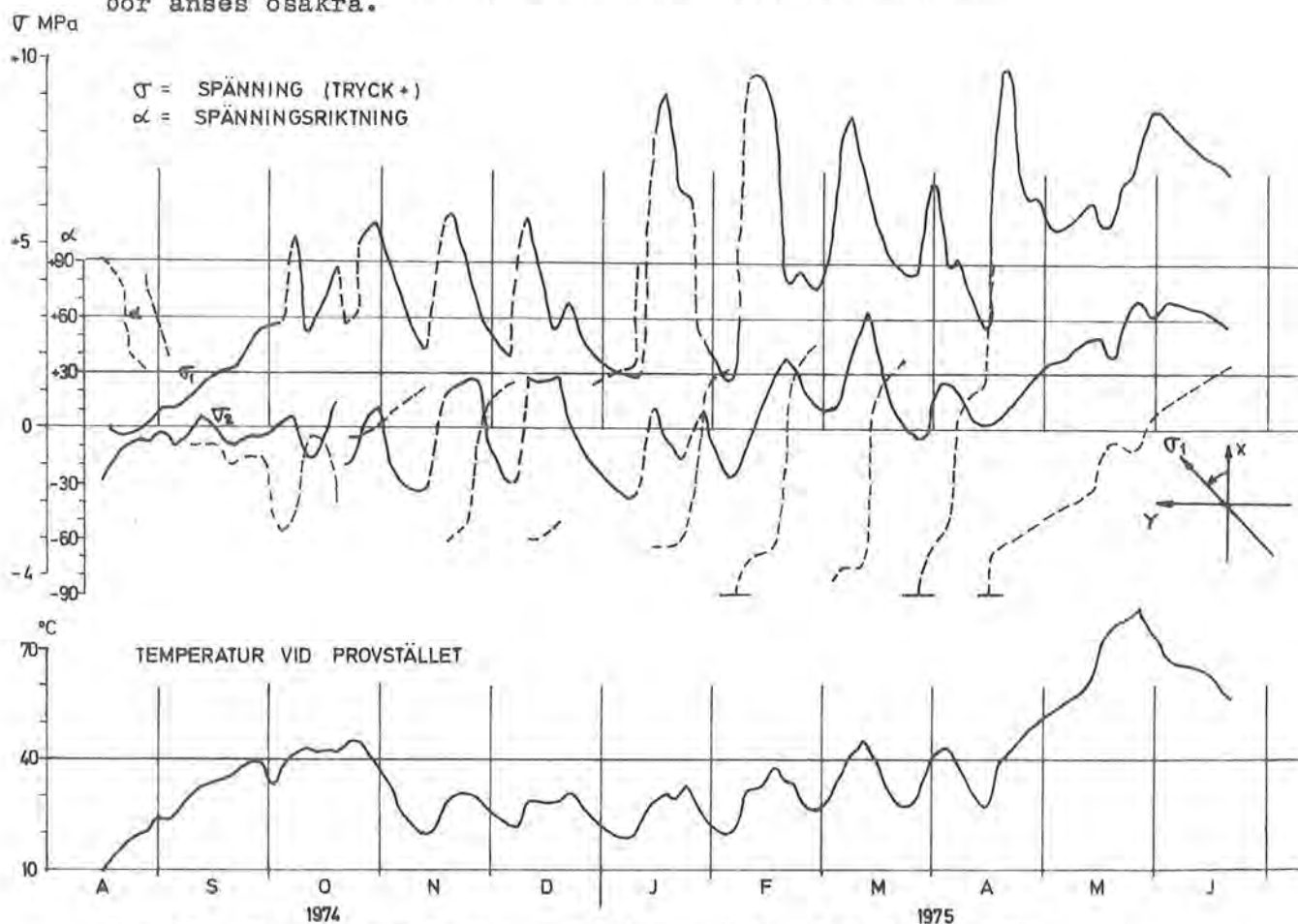


Fig 19 Uppmätta relativa spänningar i borrhål 2 pkt J30 på 7 m djup och 0,75 m från försökshållets vägg

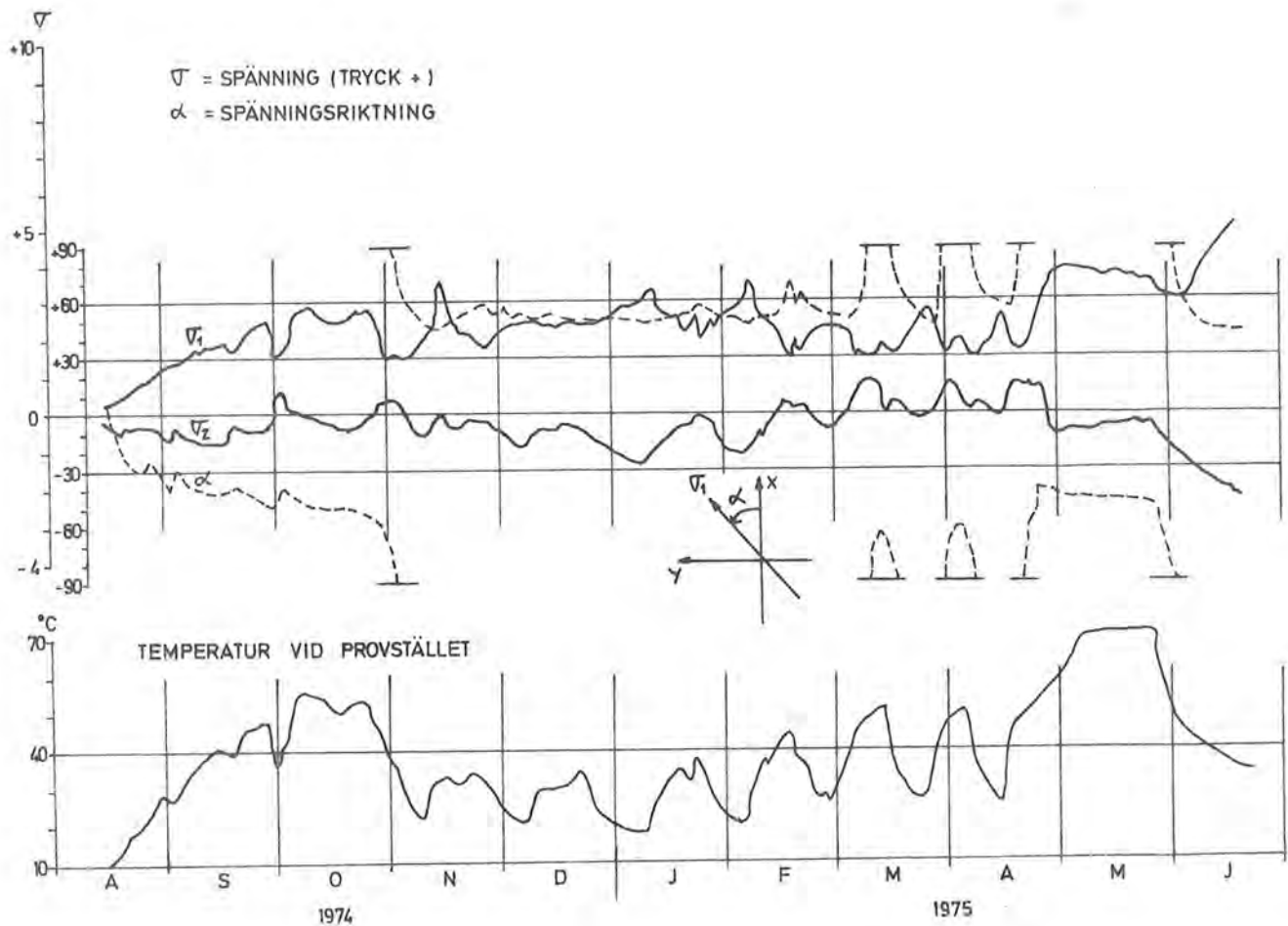


Fig 20 Uppmätta relativa spänningar i borrhål 2 pkt J31 på 14 m djup och 0,75 m från försökshålets vägg

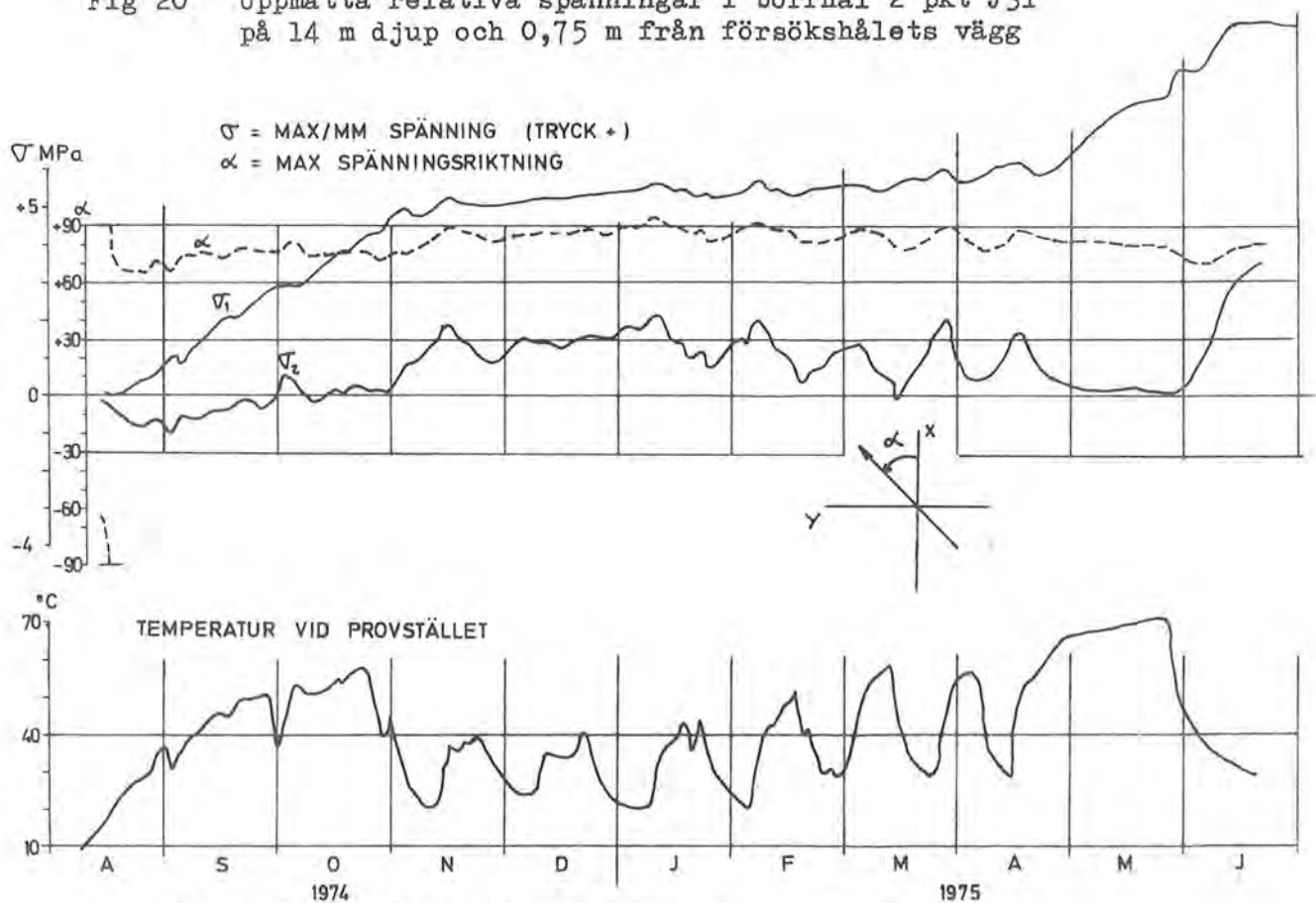


Fig 21 Uppmätta relativa spänningar i borrhål 2 pkt J33 på 18 m djup och 0,75 m från försökshålets vägg

Mätpunkten J31 visar betydligt mindre variationer i de registrerade spänningarna. Under den första uppvärmningsperioden steg temperaturen vid mätpunkten från $+10^{\circ}$ till ca $+55^{\circ}$, därvid ökade den största spänningen med ca 25 kp/cm^2 . Vid de efterföljande temperaturväxlingarna, månad 3 till 8, som vid mätpunkten uppgick till mellan 10° och 25° var variationen i bergspänningarna små, mellan 10 och 20 kp/cm^2 . Vid den sista temperaturhöjningen, då temperaturen i mätstället steg från $+25^{\circ}$ till $+70^{\circ}$ ökade den största spänningen med 20 kp/cm^2 . Markanta ändringar av spänningsriktningen kunde noteras vid de största temperaturändringarna.

I mätpunkten J33 stiger den största spänningen under den första uppvärmningsperioden med ca 50 kp/cm^2 när temperaturen ökas från $+10^{\circ}$ till $+55^{\circ}$. Under försöksperioden stiger sedan den största spänningen sakta för att vid den sista temperaturhöjningen öka markant. Spänningsökningen påverkades inte av den efterföljande avkylningen. Den lägre spänningen visar hela tiden små värden med något högre värden vid uppvärmning än under nedkylning.

8.7 Diskussion

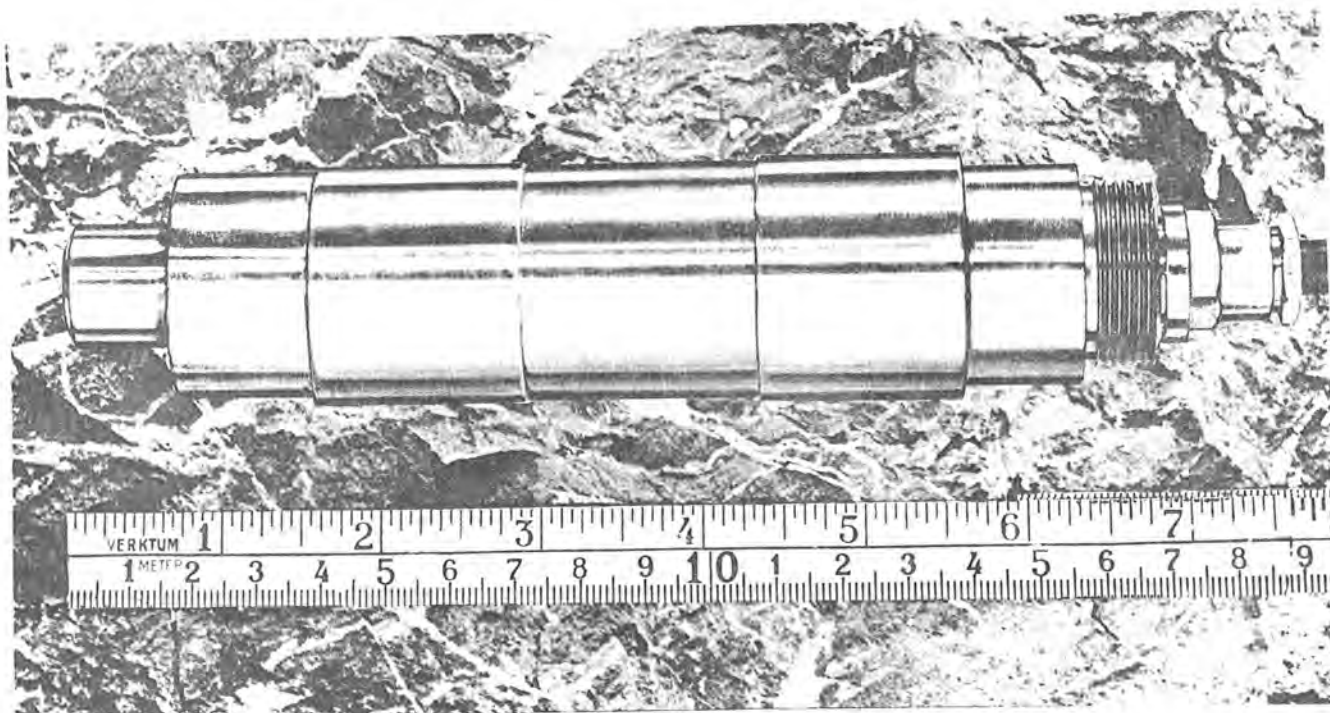
Temperaturmätningarna

Temperaturmätningarna har kunnat genomföras på ett tillfredsställande sätt och bedömts ha givit tillförlitliga resultat.

För att värdera överensstämmelsen mellan teoretisk beräkning av värmeledning i berget har värmeledningsförmågan hos berget beräknats genom tillbakaräkning utifrån den uppmätta temperaturbilden i princip enligt förfarandet i avsnitt 7.6, med en enkel rotationssymmetrisk beräkningsmodell. Beräkningarna har utförts för några olika värden på värmeledningsförmågan hos berget och resultaten har i fig 21 jämförts med uppmätta värden.

Resultaten visar att man får en mycket god överensstämmelse om värmeledningsförmågan λ antages vara $4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ i en 1-m zon närmast borrhålet och $3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ utanför denna. Värmeövergångstalet α har antagits vara ca $250 \text{ W/m}^2\text{C}$ och specifika värmekapaciteten c ca $2,0 \text{ MJ/m}^3\text{C}$. Antages λ -värdet vara $3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ i hela modellen ser man att överensstämmelsen blir sämre.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att värmeledningstalet för aktuell bergtyp bör ligga mellan $3\text{--}4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Det lägre värdet torde vara representativt för ostört berg. Dessa värden stämmer väl med vad som normalt i beräkningar antagits gälla för berggrund av ifrågavarande typ.



Stel mätcell, typ MAIHAK MDS 68 använd för registrering av spänningsändringar på grund av temperaturvariationer

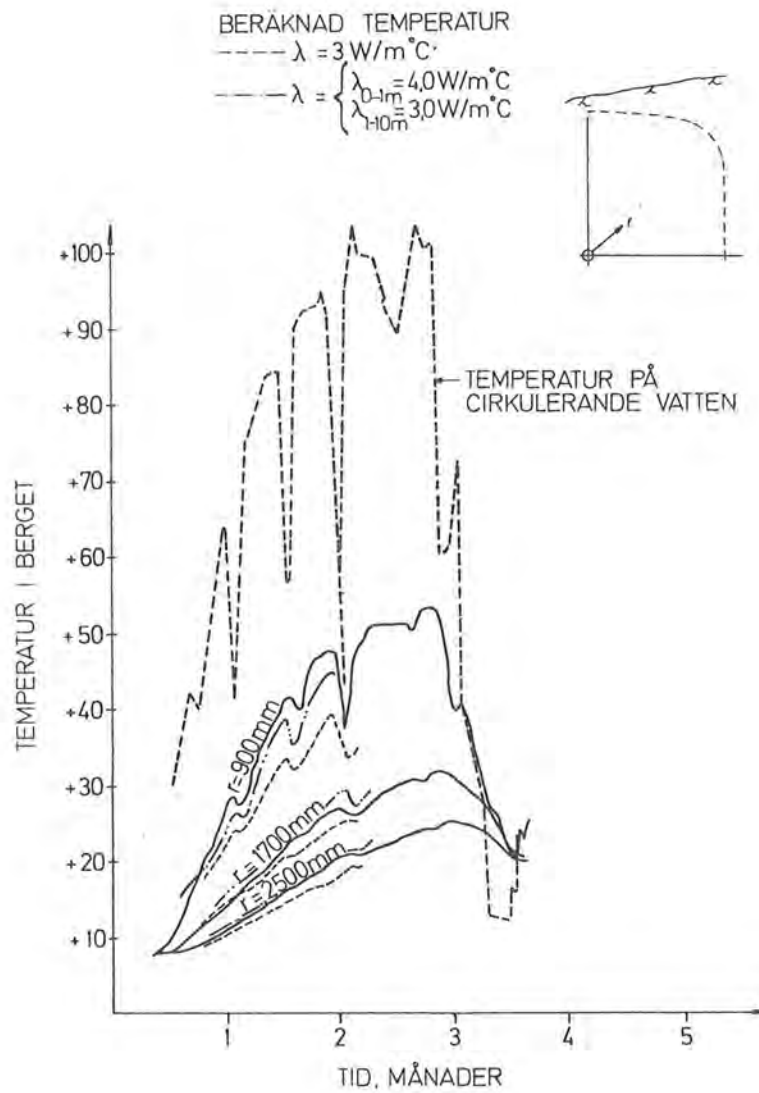


Fig 22 Jämförelse mellan beräknade och uppmätta temperaturer i berget vid borrhålsförsök för olika värden på värmeledningsförmågan λ .

Energiförbrukningen eller värmeförlusten hos det cirkulerande varmvattnet har ej direkt registrerats under försöket. En mycket grov uppskattning har dock gjorts genom jämförelse med totalt förbrukad elenergi för uppvärmning. Med ovannämnda värden på bergets värmeegenskaper utgör den beräknade förlusten till berget ca 80 % av totalt tillförd energi. Det förefaller mycket rimligt att resterande 20 % är att hänföra till förluster i yttre rörsystem etc.

Uppskattningen styrker att använda enkla beräkningsmodeller torde vara tillräckligt noggranna för praktiskt ändamål.

Spänningsmätningarna

Uppvärmningen av berget kring borrhålet bör under homogena förhållanden med slutna bergsprickor leda till en förhöjning av bergtrycket.

Även om utförda mätningar visar klara tendenser åt detta håll är de i stora delar svårtolkade och osäkra, något som icke är oväntat och vanligen utmärker spänningsmätningar i berg. Metodernas lämplighet för ifrågavarande mätproblem har dock blivit belyst.

Ursprungliga spänningsnivån mätt genom s k absoluttrycksmätning var låg och varierande i mätområdet. I det sprickiga berget råder i stort inga andra spänningar än gravitationsspänningar. Uppmätta värden är att hänföra till egenspanningar i kristallgittret i bergartsmaterialet. I en sådan i det närmaste spänningslös bergmassa måste man förvänta förekomst av mer eller mindre öppna sprickor och slag. För att några större värmespanningar skall uppstå i detta berg krävs att värmetöjningarna hos blocken förhindras, vilket först successivt sker sedan sprickorna slutit sig.

Utförda töjningsmätningar belyser i någon mån dessa frågor under avkylningsfasen.

Den negativa töjning, som borde bli resultat av en avkylning kan något illustreras av mätvärdena för den första avkylningsperioden, då vattentemperaturen under 14 dagar minskades från 102°C till 12°C, jfr fig 17.

Bergets temperatur registrerades i två mätpunkter på samma avstånd från centrumhålet (2,13) indikerar i medeltal en temperaturdifferens på ca 35 - 45°C.

Under antagande att dessa värden gäller för mätpunkten erhålles följande fria enaxiella temperaturtöjning:

$$\epsilon_t = \Delta t_b \cdot \alpha_b = 40 \cdot 13 \cdot 10^{-6} = -0,52 \text{ mm/m}$$

Temperaturutvidgningskoefficienten α har i detta fall bestämts på bergkärnor från borrhålet.

Om berget ej kan röra sig obehindrat - vilket antagits ovan - blir den uppmätta töjningen (ϵ_m) självfallet mindre genom inspänningen i omgivande^m berget och man får spänningar som motsvarar differensen $\epsilon_t - \epsilon_b$;

För ovannämnd avkylningsperiod registrerades följande töjningar i hålbotten:

$$\epsilon_x = -0,524 \text{ mm/m}, \quad \epsilon_y = -0,571 \text{ mm/m}, \quad \epsilon_{45} = -0,455 \text{ mm/m}$$

Töjningarna är praktiskt taget lika i de tre riktningarna. Detta är karakteristiskt för ren temperaturtöjning. Värdena är också av samma storleksordning, som teoretiskt beräknad fri töjning.

De uppmätta negativa töjningarna verkar sålunda vara rena fria temperaturtöjningar som ej förhindrats av omgivande berg. Sprickor och andra inhomogeniteter i berget har uppenbarligen medgivit dessa krymptöjningar utan temperaturspänningar.

De spänningsändringar som uppmättes vid de relativa mätningarna med Johnson-cellerna antyder ett tydligare samband mellan uppvärmning och ökat bergtryck. Detta gäller främst mätpunkt J33 fig 20. En beräkning baserad på förhållandena kring ett tjockväggigt rör gervid $E \approx 40 \text{ GPa}$ ett maximalt spänningstillskott av storleksordningen 5-6 MPa.

8.8 Vattenundersökningar

Under försöken har regelbundna vattenundersökningar utförts på cirkulationsvattnet (Mälarvattnet i särskild tank) i sekundärkretsen samt på läckvattnet från berget. Läckvattnet har uttagits ur två tappkranar belägna ca 0,9 respektive ca 1,8 m till vänster om provhålets centrum, se fig 17.

Omedelbart före starten av uppvärmningsförsöken uttogs prov av mälarvattnet i ovannämnda lagerbehållare samt av det naturliga läckvattnet från berget. De uttagna proven analyserades med resultat som framgår av tabell III. Av tabellen framgår att läckvattnet hade högre konduktivitet och högre halter av kalcium, magnesium, klorid, sulfat och kiselsyra än vad mälarvattnet hade.

Provtagning och analys av cirkulations- och läckvatten under försöksperioden redovisas i tabell IV.

8.9 Diskussion av vattenundersökningarna

Analyserna i tabell III och jämförelse med läckvattenanalyserna tyder på att cirkulationsvattnet i bergrumshålet ganska snabbt blivit uppblandat med läckvatten från berget, varigenom cirkulationsvattnet fått en beskaffenhet som närmat sig bergvattnets beskaffenhet. Vid den fortsatta driften under försöksperioden har variationerna i respektive vattentyp varit mycket små. Detta antyder att ingen märkbar utlösning skett från bergmaterialet i borrhålets väggar.

Tabell III Vattenanalyser före försök

				Mälarvatten från Lovö vattenverk uttaget ur lagerbehållare (GP-tank)	Läckvatten från berget, uttaget som blandprov ur två tappkranar före påfyllnad av mälarvatten
pH				7,2	7,2
Konduktivitet,		S/cm		207	400
Grumlighet,	SiO ₂	mg/l		4,5	3,3
Kalcium,	Ca	mg/l		25	54
Magnesium,	Mg	mg/l		7	10
Totalhårdhet,	Ca	mg/l		37	71
Natrium,	Na	mg/l		11	25
Kalium,	K	mg/l		2,6	3,1
Aluminium,	Al	mg/l		0,07	0,02
Järn,	Fe	mg/l		0,42	0,28
Fenolfalein-alkalitet,		mekv/l		0	0
Totalalkalitet,		mekv/l		0,99	2,3
Klorid,	Cl	mg/l		13	25
Sulfat,	SO ₄	mg/l		56	84
Fri kolsyra (ber)	CO ₂	mg/l		7	16
Ammonium,	NH ₄	mg/l		1,2	0,6
Nitrat,	NO ₃	mg/l		< 2	< 2
Kiselsyra,	SiO ₂	mg/l		1,0	10,8

Provtagningar och analyser på cirkulationsvattnet och läckvattnet visar att inga betydande variationer förekommit i beskaffenheten hos varken cirkulationsvatten eller läckvatten.

Under ca 1 månad av försökstiden var temperaturen i cirkulationsvattnet ca $+110^{\circ}\text{C}$. Under denna period noterades avsevärda ändringar i analyserna.

Av tabellen III framgår att en kraftig höjning av cirkulationsvattnets konduktivitet, kloridhalt och pH-värde uppmätts när temperaturen i systemet var ca 110°C . Samtidigt konstaterades en markant minskning av totalhårheten. Vid den efterföljande nedkylningsperioden har dock undersökta analysparametrar återgått till normala värden. Denna senare observation torde sammanhånga med inläckning av bergvatten samt eventuell påfyllnad av mälarvatten.

Den förhöjda konduktiviteten och kloridhalten vid temperaturen 110°C bedöms sannolikt bero på saltanrikning som skett genom förångning av vattnet i bergborrhålet. Anrikningsgraden kan ha ökat om bildad ånga successivt läckt ut genom sprickor i hålets väggar. Den minskade kalciumhalten och det ökade pH-värdet vid temperaturen 110°C synes sammanhånga med att kalciumkarbonat utfällts genom s k termisk avhärdning.

Enligt analysresultaten har inga betydande variationer hos läckvattnet påvisats under den sista delen av försökstiden.

Datum	Mätpkt	Tempe- ratur °C	Konduk- tivitet µS/cm	Total- hårdhet Ca mg/l	Total- alkalitet mekv/l	Fenolftalein- alkalitet mekv/l	Klorid Cl mg/l	Sulfat SO ₄ mg/l	Grumlighet SiO ₂ mg/l	pH	
<u>Cirkulationsvatten</u>											
1974	08-16	0900 ¹⁾	42	429	82	2,7	-	23	97	0,9	7,1
	10-04	0945	98	420	80	2,6	-	22	94	0,9	7,7
	11-08	0900	13	420	84	2,6	-	20	98	1,1	7,0
1975	02-27		42	359	69	2,4	-	14			7,1
	05-17		110	746	30	0,8	0,2	105			9,8
<u>Tappkran_1_</u>											
	08-16		12	427	88	2,9	-	31	98	1,1	7,2
	10-04		26	470	91	3,3	-	27	96	1,1	7,2
	11-08		22	445	87	2,8	-	22	99	0,3	7,1
1975	02-27		23	412	81	2,9	-	17	-	-	7,2
	05-07		35	412	81	3,0		17	-	-	7,3
<u>Tappkran_2_</u>											
	08-16		11	453	91	3,3	-	20	91	0,9	7,3
	10-04		15	481	96	3,4	-	23	93	0,4	7,2
	11-08		16	475	94	3,3	-	22	97	0,3	7,1
	02-27		14	412	81	2,9	-	17	-	-	7,2
	05-07		16	412	81	3,0	-	17	-	-	7,3

Vattenanalyser vid olika tillfällen

9 SLUTSATSER, FORTSATT FoU-ARBETE

Lagring och transport av varmt vatten i berg aktualiserar en mängd olika bergtekniska frågeställningar. Genom att många av dessa är föga studerade blir utredningsarbetet komplicerat, osäkert och i många avseenden trevande. En av de största svårigheterna är att försöka kvantifiera olika faktorer, något som är av väsentlig vikt vid värdering av problem i de olika objekten. En svårighet härvidlag är att man har små möjligheter att utföra tillförlitliga och representativa mätningar.

I de utförda undersökningarna har det därför lagts ned ett förhållandevis stort intresse på att pröva och värdera olika möjligheter att mäta och övervaka olika värmebetingade effekter i berget. Värdefulla mäterfarenheter har därigenom vunnits för det fortsatta forskningsarbetet, främst då för mätning i planerade demonstrationsanläggningar i full skala.

Mätresultaten är i många avseenden begränsade, osäkra och föga representativa för hela bergmassan. Trots detta erbjuder mätmaterialen - då man tidigare helt saknat mätvärden - vissa grunder för diskussion av värmebetingade bergtekniska frågor aktuella vid lagring och transport av värme i berg.

Sålunda har det varit möjligt att tämligen väl belysa värmeflödet ut i berget genom temperaturmätning i borrhål. Använd metod har givit jämna och tillförlitliga värden. De utförda mätningarna antyder att det krävs ca 1,5 - 2 år för att nå fortfarighet. Efter denna tidpunkt är värmeförlusterna måttliga och normalt väl under motsvarande ovanjordsanläggningar.

Jämförelser mellan i berget mätta verkliga temperaturer och beräknade värden visar att enkla 2-dimensionella betraktelser ger goda möjligheter att förutsäga värmeförhållandena. Tillbakaräkning utifrån mätresultaten visar att man kan förvänta sig ett värmeledningstal λ på ca 3 - 3,5 i den gnejs-granitberggrund som förekommit på försöksplatserna.

Resultaten av spännings- och stabilitetsanalyserna är avsevärt mycket osäkrare, då olika bergparametrar varierar lokalt ganska mycket, är anisotropa och är spännings- och ibland tidsberoende. Begränsade mätningar med små celler som ger punktvisa värden, ger endast tillfredsställande information under mycket gynnsamma förhållanden. I de flesta fall krävs mycket omfattande fält- och laboratorieundersökningar för att ge en representativ bild. Detta torde gälla såväl vid bruk av små punktvisa mätare, (t ex Leemanceller som större celler i t ex flat-jacks).

Utförda absolutspänningsmätningar indikerar att de ej nått några tektoniskt betingade spänningar vid försöksplatserna. Uppmätt spänningsnivå på ca 10 MPa torde sålunda främst vara att hänföra till egenspanningar i bergartsmaterialet och gravitation.

Såväl de punktvisa spänningsmätningarna som teoretiska överväganden indikerar att en uppvärmning med ca 100°C ger spänningstillskott på ca 10 - 30 % av bergmaterialets tryckhållfasthet (100 - 200 MPa). Erfarenheter från djupt belägna gruvrum och berganläggningar i berg med högt bergtryck visar att man ofta kan tolerera avsevärt högre spänningsnivåer, utan större men för rummens stabilitet.

I detta sammanhang bör framhållas att enkla spänningsbetraktelser enligt ovan endast i begränsad utsträckning visar stabilitetssituationen. Rörelsemöjligheter och töjningen i bergmaterialet kring rummet torde spela en väl så stor roll.

Utförda kemiska analyser av cirkulationsvattnet visar att det utlösta bergmaterialet i det varma vattnet, normalt understiger analysprecisionen. Här ger utbyte med omgivande grundvatten genom sprickor i berget upphov till större förändringar.

De mycket små utlösta mängderna innebär dock ej att man helt kan bortse från problemet, då kraven på cirkulationsvattnet är mycket höga. Effekter i värmeväxlare o dyl, liksom möjligheter att kemiskt konditionera vattnet bör djupare studeras.

9.1 Försök i demonstrationsanläggningar

Värmelager i berg

Föreliggande försöks- och utredningsmaterial utgör i befintligt skick en väsentlig del i erforderligt konstruktionsunderlag för ett värmelager i berg. En rad frågor återstår dock, där det krävs ytterligare fördjupade studier. Ytterligare detaljanalyser och begränsade laboratorieförsök ger dock information av begränsat värde, då man idag ej tillfredsställande känner de bergmekaniska samband som är aktuella för ett värmelager i berg. För att undvika orimligt omfattande och tidsödande detaljanalyser, krävs sannolikt att förhållandena studeras med ett samlat helhetsgrepp i en demonstrationsanläggning i full skala. Noggranna observationer och mätningar bör kunna ge den grova totala "summabild" av olika effekter som fordras för det fullständiga konstruktionsunderlaget. För att kunna generalisera och allmänt tillämpa resultat från försök i en demonstrationsanläggning är det självfallet av mycket stort värde att sådana experimentella studier kompletteras med fördjupade detaljanalyser och allmänna teoretiska överväganden.

Under förutsättning att man snarast möjligt önskar nyttja föreslagen värmelagrings teknik är det mycket som talar för prov i en demonstrationsanläggning.

Ur försökssynpunkt är det lämpligast om den första anläggningen kan utgöra t ex reservkapacitet för en större hetvattenpanna vid ett värmeverk. I fig 23 visas förslag till en sådan provanläggning i anslutning till tunnelsystem i ett befintligt värmeverk.

En sådan funktion och placering ger goda möjligheter till experiment och flexibla försöksprogram, samtidigt som en väsentlig driftsfunktion blir löst.

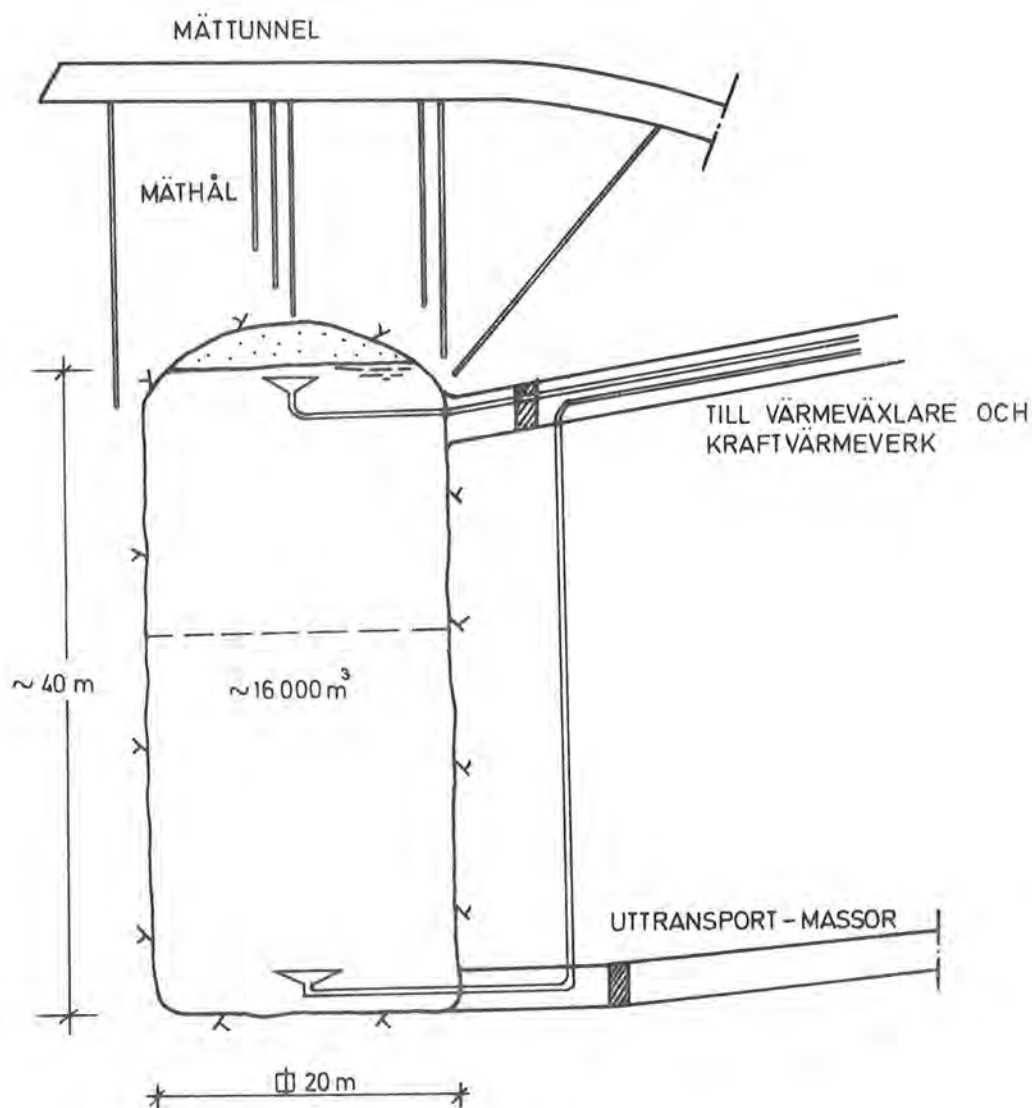


Fig 23 Principskiss över demonstrationsanläggning för lagring av vattenburen värme i berg

Anläggningen bör instrumenteras för mätning av spänningar, deformationer, mikroseismer ("knäppningar") och temperatur i flera punkter i berget runt anläggningen. Mätningarna bör pågå under flera år. Vidare bör de termodynamiska förhållandena i hetvattnet samt dettas kemiska sammansättning kunna kontrolleras.

Organisatoriskt bör ett sådant projekt anknytas till energiansvariga organisationer, t ex Vattenfall, VAST, CDL eller Värmeverksförening. Även flera svenska kommuner har visat intresse för en dylik anläggning, men kan ej individuellt klara av risktaganden och de extra kostnader som är knutna till prototypanläggningen, då man ju normalt saknar medel för forskning.

Transport av varmt vatten i berg

Förförsöken vid Ugglevikskällan har visat på en rad problemställningar som fordrar djupare studier för att tillfredsställande kunna besvaras. Med hänsyn till projektets förväntade stora ekonomiska potential är intressenterna och referensgruppen angelägna om att man bör gå vidare, i första hand med förberedande utredningar för fältförsök i fullstor skala.

Visar förstudierna för "fullskaleförsök med varmvatten-transport i oinklädd bergtunnel" att projektet är tekniskt och ekonomiskt sunt, bör man försöka att få fram en försökstunnel inom ett existerande fjärrvärmedistributionsnät.

Man kan tänka sig att tidigare lägga en planerad tunnel för fjärrvärmedistribution i isolerade stålrör. Sådana förslag har framlagts av Stockholms Energiverk. Om försökstunneln utgör en parallellgren i nätet är det lätt att tidvis överföra varmvatten i den och under andra tider ha den avstängd för inspektion m m. Den föreslagna förläggningen innebär också fördelar beträffande tillgång till uppvärmt vatten och tillräckligt lång tunnel.

Vid tunnelförsöket bör man mäta och observera temperaturspridning, bergspänningar, vattenkemi, avskalnings-effekter m m under en flerårsperiod.

Organisatoriskt bör projektet vara väl förankrat hos ansvariga för värmedistribution inom tätorter och producenten av värmets, t ex Stockholms Energiverk och Vattenfall.

10 UTFÖRDA UTRÄDNINGAR, ARBETSRAPPORTER OCH REFERENSER

Arbetsrapporter inom etapp II

1. S Bjurström, T Hansson, "Hetvattenlagring i bergrum, etapp II - fältmätningar". BFR-ansökan, Stockholm 1973
2. T Lundgren, P Ahlberg, "Geologisk dokumentation av oljelagerrum i Marviken". Statens Geotekniska Institut, uppdrag 50327, Stockholm 1974
3. R Hiltcher, Strindell, "Bergspänningsmätning ovanför oljelager i Marviken", Statens Vattenfallsverk, rapport L-458, Stockholm 1976
4. T Hansson, "Temperatur- och spänningsmätning i Marviken. Fältmätningar". Skånska Cementgjuteriet, rapport, Stockholm 1976
5. A Göransson, "Varmvattentransport i oinklädda berg-tunnlar - förförsök". VBB-rapport, Stockholm 1976
6. T Tarandi "Beräkning av temperatur- och spänningsfördelning vid oljelager i Marviken och i test-tunnel", VBB-rapport, Stockholm 1976
7. U Lindblom, "Bergtekniska konsekvenser av lagring och transport av varmt vatten i oinklädda bergrum och tunnlar. Allmänna synpunkter". Hagconsult-rapport, Stockholm 1976
8. S Bjurström "Lagring och transport av värme i berg. Sammanställning av utförd BeFo-forskning". BeFo-rapport, Stockholm 1977

Refererad litteratur

9. S Bjurström et al, "HETVATTENLAGRING I BERGRUM. Bergtekniska konsekvenser av lagring av varmt vatten i oinklädda bergutrymmen". BeFo-rapport, Stockholm 1974
10. R Hiltcher, "Studium och jämförelse av olika metoder för bergspänningsmätning använda inom Norden". Gruvföreningen/Gruvforskningen-rapport, Stockholm 1973
11. T Haagen, "Kontinuerlig bergtrycksmätning med stel cell - teori och praktik". Bergmekaniskt disk.möte 1971, IVA-rapport 38, Stockholm 1971

BILAGOR:

Bilaga 1

Temperaturmätning vid Marvikens oljelager, mätsektion A, B och C. Mätvärden

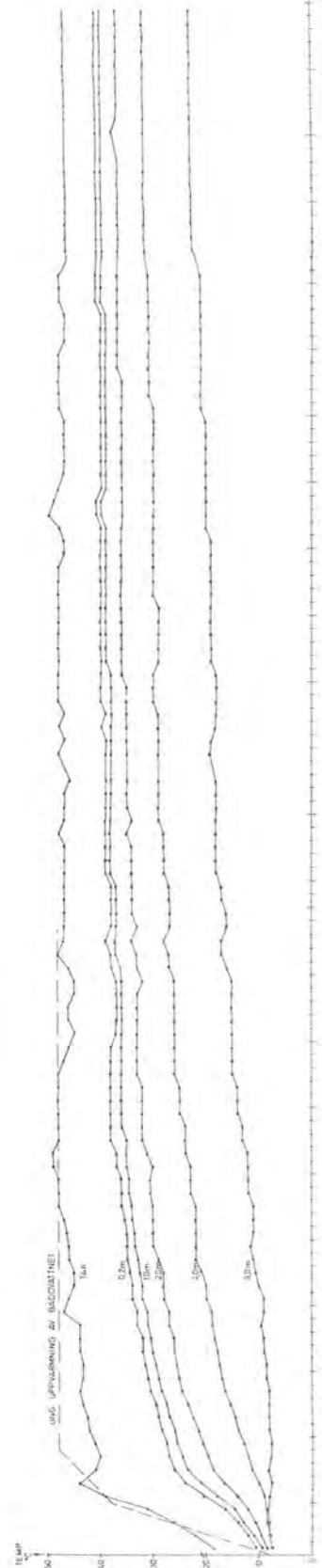
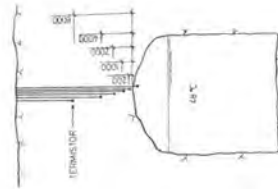
Bilaga 2

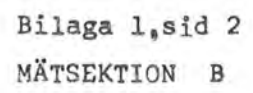
Relativ bergspänningsmätning vid Marvikens oljelager. Mätvärden och kalibreringsdiagram

Bilaga 3

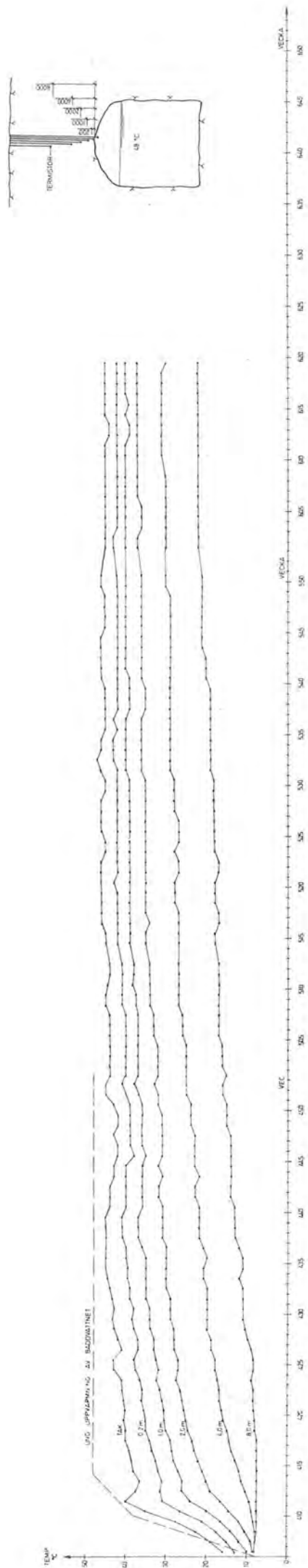
Temperaturmätning vid Ugglevikskällan. Varmvattenuppvärmt bergborrhål. Mätvärden

MÄTSEKTION A



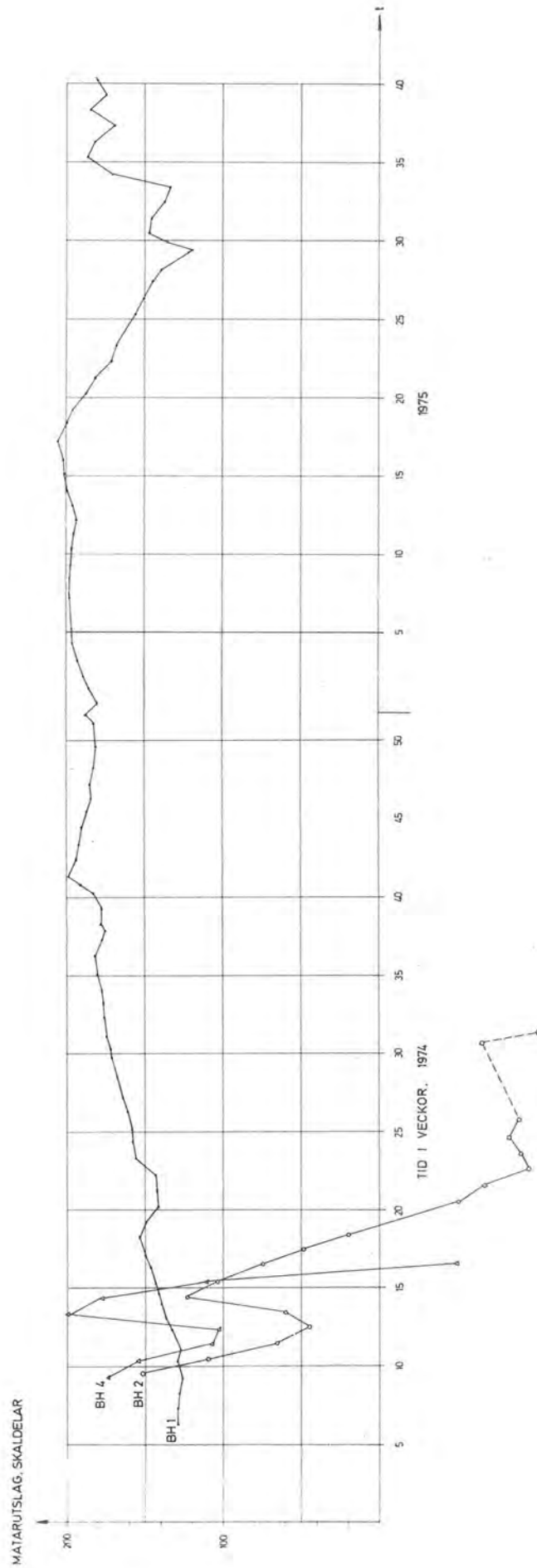


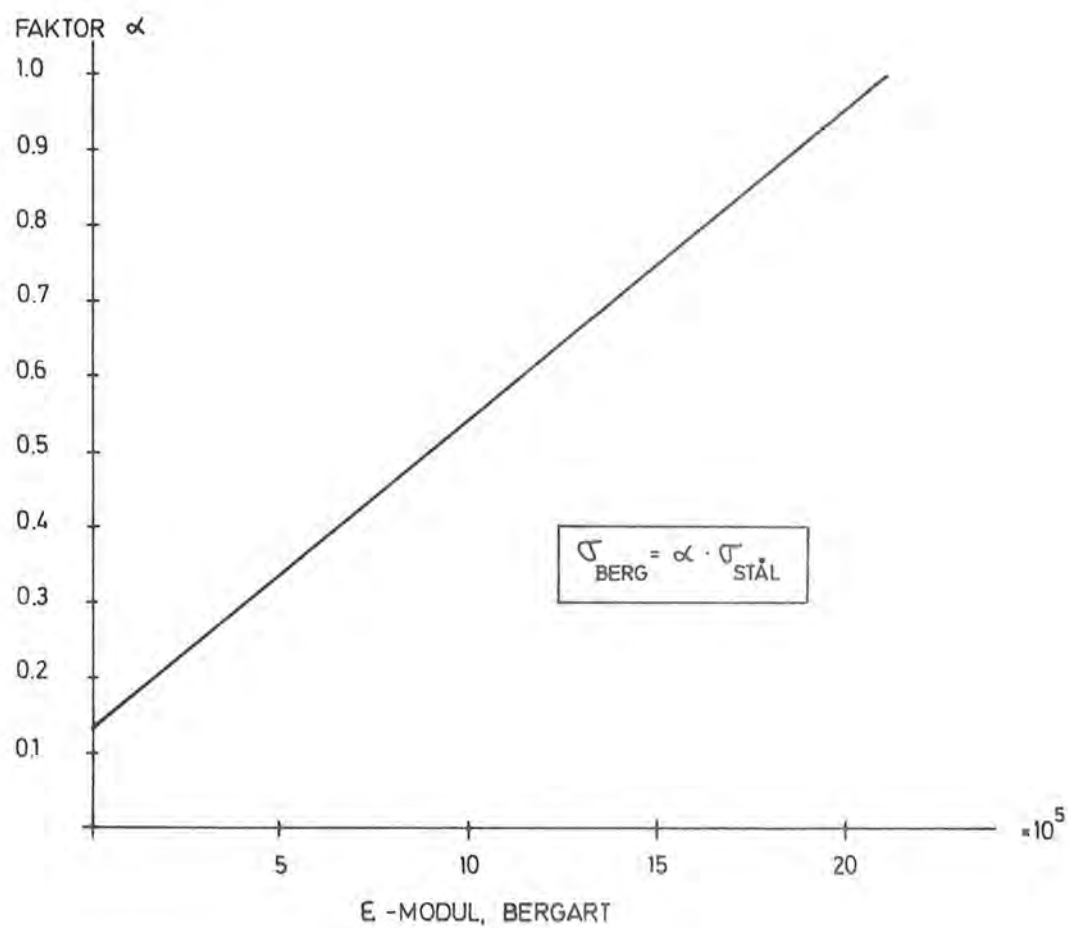
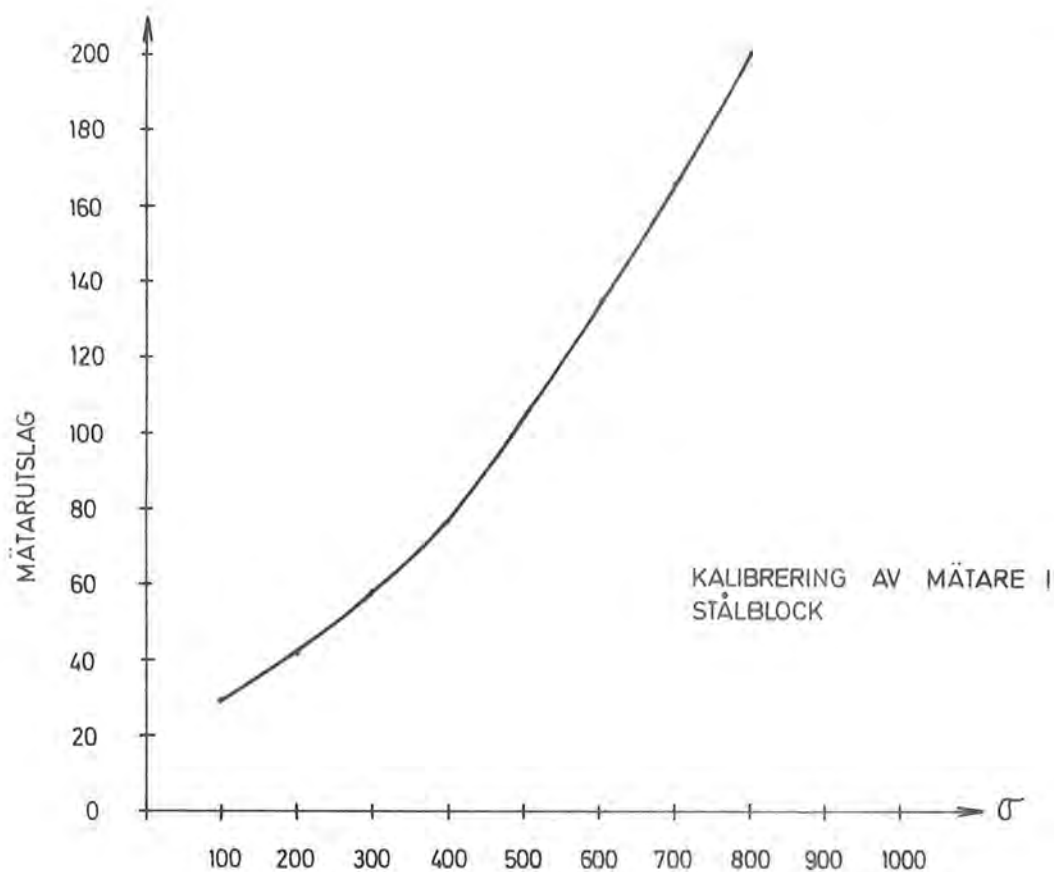
MÄTSEKTION C

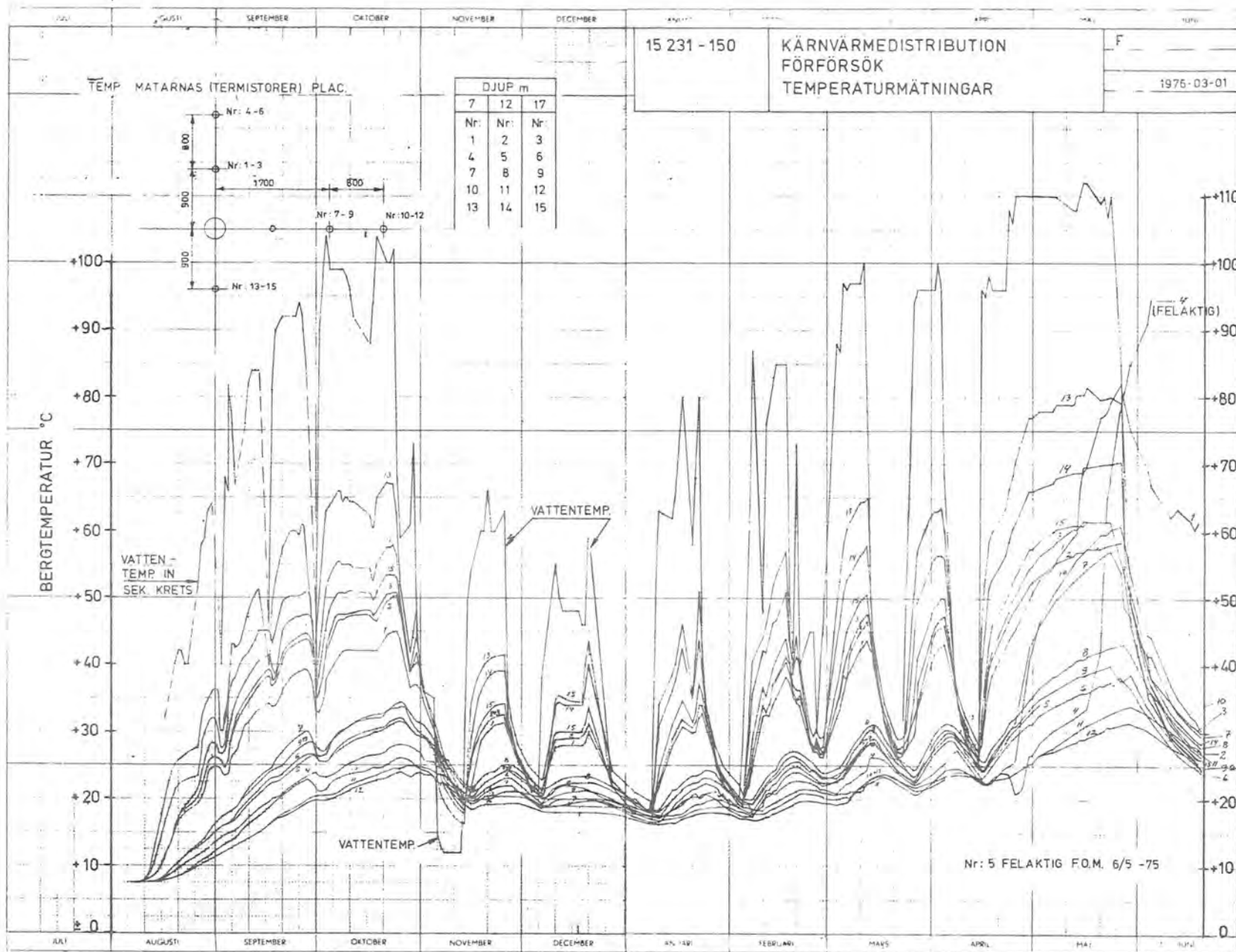


RELATIV BERGSPÄNNINGSMÄTNING
MARVIKEN 1974 o.-75

MÄTARUTSLAG







Temperaturmätningar. Varmvattenvärmat bergborrhål